Évaluation agro-économique ex-ante de systèmes de culture en agriculture familiale : le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (Nord Vietnam)

Damien Hauswirth

▶ **To cite this version:**

Damien Hauswirth. Évaluation agro-économique ex-ante de systèmes de culture en agriculture familiale : le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (Nord Vietnam). Agronomie. Montpellier Supagro; Ecole nationale superieure agronomique de montpellier - AGRO M, 2013. Français. NNT : . tel-00944072

HAL Id: tel-00944072

https://theses.hal.science/tel-00944072

Submitted on 10 Feb 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Collège Doctoral du Languedoc-Roussillon

THÈSE

Pour obtenir le grade de

Docteur

Délivré par le

Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques

Montpellier

Préparée au sein de l'école doctorale SIBAGHE
Et des unités de recherche SCA / SYSTEM
Spécialité : Agronomie

Présentée par : Damien HAUSWIRTH

Evaluation agro-économique *ex-ante* de systèmes de culture en agriculture familiale :

Le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (Nord Vietnam)

Directeurs de thèse :
Jacques WERY et Pablo TITTONELL

Co-encadrants :
François AFFHOLDER et Damien JOURDAIN

cirad

Montpellier SupAgro

Soutenue le 18 décembre 2013 devant le jury composé de :

Jacques CANEILL, PR., Agrosup Dijon	Président du jury
Philippe DEBAEKE, DR., INRA Toulouse-UMR AGIR	Rapporteur
Jacques WERY, PR., Montpellier SupAgro	Directeur de thèse
Stéphane DE TOURDONNET, MC. Montpellier Supagro	Examinateur

Sommaire

Sommaire 2
Remerciements 6
Liste des tableaux 8
Liste des encarts et figures 10
Résumé 13
Abstract 15
Introduction générale 17
1. La nécessité d'une intensification agricole accrue pour répondre à l'évolution de la demande alimentaire 17
2. L'agriculture de conservation (AC), une opportunité d'intensification durable de la production agricole ? 17
3. Objectif général et contexte 18
4. Cadre institutionnel et scientifique 18
Chapitre I. Contexte et problématique 19
1. Objectif général du travail de recherche 20
2. Contexte 21
2.1. Une région caractérisée par une très forte hétérogénéité biophysique 21
2.2. Une intégration au marché récente accompagnée d'une intensification rapide de la production agricole 26
2.2.1. La ré-émergence du secteur privé sous contrôle de l'Etat (1990-2000) 26
2.2.2. Une intégration croissante au marché (2000 - 2012) 27
2.3. Explorer le potentiel de l'agriculture de conservation pour intensifier durablement les systèmes maïs sur pente 29
3. Problématique de recherche 31
4. Démarche générale de la thèse 31
Chapitre II. Démarche et méthodes 33
1. Une approche des systèmes agricoles quantitative et restreinte aux principaux caractères structurants des types de systèmes élaborés 34
1.1. Systèmes de culture et systèmes de production 34
1.2. Typifier les systèmes pour réduire la dimensionnalité du diagnostic agraire 35
1.3. Une typologie de systèmes de production générée en suivant une approche positiviste 36
1.4. Un parti-pris de catégorisation des systèmes de culture à partir d'analyse multivariée. 36
2. Une évaluation des performances des systèmes agricoles mobilisant des indicateurs opérationnels de durabilité 37
2.1. Une analyse adossée au concept de durabilité 37
2.2. La construction d'un ensemble d'indicateurs opérationnels de durabilité centrée sur l'effet potentiel des pratiques agricoles 37
3. Une évaluation de l'attractivité économique de prototypes de systèmes de culture en agriculture de conservation basée sur une analyse en regroupement de données collectées au sein de sites de démonstration-formation 38

3.1. Une perspective méta-analytique restreinte pour répondre à une question de recherche à partir de données collectées sur des sites de démonstration 39
3.2. Les hypothèses relatives aux systèmes de culture évalués 39
3.3. Les hypothèses relatives à l'impact de l'agriculture de conservation sur la productivité agricole en zone tropicale de montagne 42
3.4. Attractivité de l'agriculture de conservation à d'autres échelles que le champ cultivé..... 44
Chapitre III. Categorizing and describing cropping systems to identify sustainability gaps: a multivariate classification approach applied to maize-based systems in northern Vietnam 45
1. Introduction 47
2. Material and methods 48
2.1. Methodological framework 48
2.2. The study area 50
2.3. Village selection 53
2.4. Survey characteristics 53
2.5. Multivariate analysis 54
2.5.1. Typology of farming systems 54
2.5.2. Typology of maize cropping systems 55
2.5.3. CART classification analysis 56
2.5.4. Performances of maize based cropping systems 56
3. Results 59
3.1. Identification of farm types 59
3.2. Identification of cropping systems 61
3.3. Identification of the most discriminant drivers of cropping system diversity 65
3.3.1. CART model 1: cropping system as a function of territory characteristics. 65
3.3.2. CART Model 2: cropping system as a function of farm types and farmers socioeconomic conditions 65
3.3.3. CART Model 3: cropping systems as a function of field biophysical conditions 65
3.3.4. CART Model 4: cropping system as a function of territory characteristics, farm/farmers characteristics and field biophysical conditions 66
3.4. Relationships between cropping systems, territory characteristics, farm types, farmers' socioeconomic characteristics and field biophysical conditions 66
3.5. Sustainability performances of cropping systems 72
3.5.1. Correlations and tradeoffs between productivity, profitability and pressure on the environment 72
3.5.2. Common sustainability gaps 72
3.5.3. Specific sustainability issues and performance advantages 74
4. Discussion 76
5. Conclusion 82
6. Acknowledgements 82
Chapitre IV. Land conversion to Conservation Agriculture in tropical mountainous areas: assessing from demonstration sites short-term impact on productivity and profitability at field scale 83
1. Introduction 85

2. Materials and methods 86
2.1. The study region 86
2.2. The demonstration sites 87
2.3. The cropping system prototypes 90
2.4. Data collection and measurements 91
2.4.1. Indicators and timeline considered 91
2.4.2. Agronomic productivity and efficiency 92
2.4.3. Economic profitability and acceptability 92
2.5. Data analysis 92
2.6. Comparison with farmer fields 94
3. Results 94
3.1. Maize grain yields, N recovery efficiencies and rainfall use efficiencies 94
3.2. Economic acceptability and profitability 98
4. Discussion 99
4.1. Conditions for a yield increase from the second year 99
4.2. Does equivalent economic profitability make CA worth for farmers? 102
4.3. Investigating stepwise conversion to CA 102
4.4. Integrating field-scale environmental impact assessment 102
4.5. Investigating transition to CA with bio-economic farm models 102
5. Conclusion 103
6. Acknowledgments 103
Chapitre V. Discussion générale et perspectives 104
1. Rappel des objectifs de la thèse 105
2. Les principaux résultats obtenus, leur domaine de validité et leur implication pour le développement 106
2.1. Principaux résultats obtenus 106
2.2. Implications pour le développement 106
2.3. Domaine de validité des résultats et identification des biais 109
3. Limites majeures et perspectives associées 111
3.1. Postulats sous-jacents 111
3.1.1. Premier postulat sur les modalités d'intensification écologique à promouvoir 111
3.1.2. Second postulat relatif à la reproductibilité des typologies produites par analyse multivariée 113
3.1.3. Troisième postulat relatif aux conditions d'attractivité économique d'innovations de rupture 113
3.2. Mobiliser des modèles bioéconomiques pour explorer l'attractivité d'innovations techniques à l'échelle de l'exploitation 114
3.2.1. Approfondir l'intégration des aspects fonctionnels dans les typologies de systèmes agricoles pour juger de l'attractivité technique et économique d'innovations de rupture 114

3.2.2. Adosser l'évaluation de l'attractivité économique des systèmes de culture à différents horizons temporels de décision en lien avec les capacités économiques et l'espérance de gain des acteurs 114
3.2.3. Mettre en relation les performances agro-économiques de l'agriculture de conservation avec les types de systèmes de production 115
3.3. Développer des modèles de règles de décision à l'échelle des systèmes de culture pour rendre compte de la flexibilité des pratiques et des logiques d'acteurs 116
3.4. Intégrer la variabilité spatio-temporelle dans l'évaluation des performances des systèmes agricoles 117
3.5. Intégrer les indicateurs mobilisés à différentes échelles spatiales et temporelles en incluant des seuils de faisabilité et d'optimalité et en construire une représentation partagée 118
3.5.1. Construire une représentation partagée des indicateurs 118
3.5.2. Intégrer des plages de signification pour interpréter les mesures associées aux indicateurs retenus 118
3.5.3. Analyser ex-ante l'impact environnemental de pratiques agricoles en cours de conception à des échelles supérieures à l'exploitation 118
3.6. Coupler expérimentation et modélisation dans l'évaluation des systèmes 119
3.7. Evaluer la contribution des dispositifs de création diffusion aux processus sociotechniques d'innovation locale 123
Références bibliographiques 124
Annexe 1. Impact of farm income maximization timeline on CA economic attractiveness: preliminary results of a bio-economic farm modeling approach in Northern Vietnam: 134
Introduction 134
Material and methods 135
Preliminary results 139
Annexe 2. Diaporama présenté lors de la soutenance de thèse du 18/12/2013 144

Remerciements

Les dettes associées à ce travail sont nombreuses, et ces quelques lignes ne rendent que très imparfaitement compte de ma reconnaissance envers celles et ceux qui y ont contribué tout en le subissant.

Je dois à Damien et François d'avoir lancé la première perche à une velléité ancienne, dans le calme très typique d'une gargote vietnamienne de bord de route essentiellement fréquentée par des porte-containers lourdement chargés… mais également d'avoir investi tout du long de ces trois années en conciliant humour et efficacité pour m'aider à mener à bien ce projet.

En acceptant de codiriger cette thèse en dépit d'un emploi du temps chargé, Jacques et Pablo m'ont offert l'opportunité de la concrétiser en mettant la dernière pierre à un montage administratif complexe. Pablo, je te suis particulièrement redevable de m'avoir le premier montré comment transformer mes réflexes d'ingénieurs en une pratique plus scientifique. Tes calmes interrogations en réponse à mes dénégations souvent un peu trop rapides ont été précieuses pour avancer, que ce soit au Vietnam ou à Wageningen. Jacques, vos commentaires ont largement contribué à élargir mon horizon et clarifier ma pensée. Je vous remercie tout particulièrement pour l'efficacité de vos relectures et votre sens de l'opérationnel, qui m'auront permis de ne pas trop dévier du chemin tracé.

Cécile Fovet-Rabot aura consacré beaucoup de temps à relire mes premiers écrits et tenter de m'inculquer à distance quelques notions de rédactionnel scientifique à travers des commentaires fouillés. Je lui suis profondément reconnaissant pour m'avoir aidé à progresser. Mesurant le chemin qu'il me reste à accomplir en matière d'écriture, je dois confesser une certaine sympathie pour les poules, qui ayant pondu leur 248ème œuf, doivent se préparer à pondre les suivants.

Cette thèse n'était pas initialement prévue dans l'assistance technique au NOMAFSI pour la mise en œuvre du projet ADAM. Son montage a de ce fait nécessité l'accord de l'ensemble des parties prenantes au projet. Le soutien inconditionnel de M. Ha Dinh Tuan aujourd'hui décédé, ainsi que celui du Dr. Le Quoc Doanh, l'ont plus particulièrement rendu possible en déterminant la possibilité du soutien financier qui m'a été accordé par le CIRAD, l'AFD et le projet PAMPA. Je remercie plus particulièrement Robert Habib, François Côte, François Julien et Patrick Dugué dont les interventions m'ont permis de disposer des moyens matériels nécessaires aux missions d'encadrement, déplacements, formations, enquêtes et analyses diverses. Un certain nombre de personnes ont par ailleurs passé du temps à gérer un cadre administratif pas toujours des plus simples pour me permettre d'achever ce travail dans des conditions idéales –André, Bernadette, Patrick, Jean-Claude, Jean-Charles, Tran Thi Chau-. Je leur en suis reconnaissant.

Ce travail doit à l'implication professionnelle et personnelle de Thao et Dung dans la conduite des activités de terrain. Soupes de tripes ou de sang caillé au petit matin, lau et ruou les soirs froids et pluvieux d'hiver auront certainement contribué à relativiser brûlis incontrôlés, buffles se régalant des plantes de couverture péniblement installées, épandages d'atrazine imprévus, identification de données auto-générées par une sous-traitance déterminée à maximiser sa fonction d'utilité, perte d'un site après deux années d'investissement de terrain, parcelles couples infructueuses ou simple averse de grêle s'abattant sur quelques hectares du district incluant l'un des sites de démonstration. Ils ont également adouci l'accès aux matrices de création-diffusion, relevant selon la saison et l'horaire de mes passages du ski hors-piste, du four à micro-onde ou d'une préparation à envisager pour des qualifications au triathlon d'Hawaï… Ces anecdotes qui font partie intégrante du métier d'agronome participent de la certitude d'avoir eu beaucoup de chance à évoluer dans le contexte qui fut le mien au cours de ces cinq dernières années.

Plusieurs étudiants ont contribué à ce travail par leur engagement sur un terrain parfois rugueux. Florent, Fiona, Rada, Karine et Claire, j'ai beaucoup appris en participant à votre encadrement…

Deux d'entre vous m'auront également été d'un grand soutien dans la négociation nocturne d'une autorisation de terrain avec le comité populaire de Moc Chau.

J'ai réalisé ce travail positionné au sein de l'équipe SIA, dont les valeurs au service du développement et le sens du terrain m'ont énormément appris. Ma reconnaissance va plus particulièrement à Christine, pour sa gentillesse et son professionnalisme, à Francis Forest et Jean-Claude Legoupil, pour leur soutien à ce projet, ainsi qu'à Pascal, Stéphane, André, Johnny, Franck, Florent et Patrice pour les compétences spécifiques qu'ils ont su partager et leurs encouragements constants. Je leur dois beaucoup.

J'ai eu par ailleurs la chance au cours des deux dernières années de travailler aux côtés du Dr. Pham Thi Sen, directrice du projet ADAM pour la partie Vietnamienne. Au cours des longs trajets reliant Hanoi aux montagnes du Nord-Vietnam, j'ai pu apprécier son honnêteté intellectuelle, son engagement en faveur du développement, et sa profonde humanité. Elle est à mes yeux un exemple de ce que le Vietnam peut conjuguer de la façon la plus harmonieuse qui soit.

Il ne serait pas juste d'oublier ceux qui m'ont mis en garde sur l'investissement connexe d'une thèse –je dois admettre que je n'en avais pas la moindre idée-, ainsi que ceux qui ont douté de ce projet : ils m'auront permis de renforcer ma détermination à le mener à bien.

J'oublie certainement ici bon nombre de ceux que j'ai eu la chance de croiser au cours de ces trois dernières années, en particulier toutes celles et ceux qui ont patiemment supporté mes cafés et ma fumée, starters du démarrage très progressif de mes neurones au petit matin. Je les en remercie tout particulièrement.

Evoluer dans les montagnes du Nord Vietnam conduit inévitablement à un sentiment d'admiration pour les hommes et les femmes qui mettent en valeur un milieu aux conditions biophysiques particulièrement difficiles. Ceci conduit également à s'interroger sur la rapidité de la transition agraire et ses perspectives de développement tandis que se creuse le fossé économique entre villes et campagne. Au gré des déplacements effectués, l'accueil des agriculteurs en dépit des conditions de vie auxquelles ils sont confrontés est une expérience marquante. Je les remercie tout particulièrement à travers ce travail qui leur est en premier lieu consacré.

L'affection des miens, parents, fratrie, famille vietnamienne et amis proches a été importante au cours de cet exercice, en particulier aux moments où pointait l'envie de transformer mon ordinateur en déchet non recyclable. Pascal et Li-Xiao, votre soutien me reste à cet égard précieux à bien des points de vue. Il n'a pas toujours été facile de concilier la conduite d'un projet de recherche agronomique pour le développement, ce travail de thèse et le temps familial. Ce dernier n'a pas toujours été privilégié et mes trois enfants ont été largement confrontés à un papa absent physiquement… ou intellectuellement. Mon épouse Quyen a veillé au grain et assuré le relais en plus de son propre travail. Aboutir n'aurait pas été réalisable sans elle. Il me faut par ailleurs admettre que le temps a passé plus rapidement que prévu: Li-Anne vient de rentrer au collège, Yami émet des doutes sur l'existence d'Harry Potter et Jeantoine s'adapte brillamment à la grande section de maternelle. Je leur dois du temps pour démontrer que non, papa n'a pas plus d'affection pour son ordinateur que pour eux et quelques promesses en cours dont la première vient à échéance immédiatement après la soutenance…

Liste des tableaux

Table III-1. Land use and population related indicators for the two districts 51

Table III-A. List of variables used to categorize farms on a structural basis by principal component analysis complemented by hierarchical cluster analysis 54

Table III-2. Variables used in the CART analysis to analyze drivers of cropping systems 57

Table III-3. Indicators used to assess cropping system sustainability performances 58

Table III-4a. Mean values of a selection of farm-scale characterization variables reflecting farm resource endowment 60

Table III-4b. Mean values of a selection of farm-scale characterization variables reflecting household livelihood and farm economic performances 60

Table III-5. Farm typology on a structural and functional basis. 61

Table III-6. Characteristics of cropping systems types and subtypes as resulting from multiple correspondence analysis complemented by hierarchical clustering. 64

Table III-B. Frequency of cropping systems types and management practices within farm types 72

Table III-7. Main sustainability gaps and advantages of the identified cropping systems 74

Table III-8. A comparison of different typological methods aiming at investigating diversity of land use / cropping systems 81

Table IV-1. Mean values of a set of soil parameters recorded at three layer depths (0-10, 10-20 and 20-40 cm) in demonstration sites of Chieng Hac, Phieng Luong and Suoi Giang, prior to implementing demonstration. 89

Table IV-2. Fertilization treatments (Chieng Hac, Phieng Luong and Suoi Giang - Mountainous area of Northern Vietnam) 90

Table IV-3. Indicators used to assess the sustainability performances of cropping system prototypes demonstrated at Chieng Hac, Phieng Luong and Suoi Giang 91

Table IV-4. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and maize rainfall efficiencies (kg maize grain.mm rainfall-1) compared for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA) in the first and second year of demonstration 94

Table IV-5. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and maize rainfall efficiencies (kg maize grain.mm rainfall-1) compared between the first and the second year of demonstration at fertilisation levels F2 and F3 95

Table IV-6. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and rainfall use efficiency (kg maize grain.mm rainfall-1) compared between the first and the second year of demonstration for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA). 95

Table IV-7. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and rainfall use efficiency (kg maize grain.mm rainfall-1) compared the second year of demonstration between rotational options for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA) 96

Table IV-8. Two-year production costs, labour use and returns to land, labour and production costs compared for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA) at two fertilization level 98

Table IV-9. Two-year production costs, labour uses and returns to land, labour and production costs compared for rotational option at the three sites 100

Tableau V-1. Principales implications de la typologie de systèmes de production pour le développement de l'agriculture de conservation au Nord Vietnam (identification de niches d'innovation) 107

Tableau V-2. Principales limites de validité inhérentes au travail réalisé. 110

Tableau V-3. Principaux biais inhérents au travail réalisé. 110

Tableaux annexes

Table 1. Main characteristics of the selected sites 135

Table 2. Main characteristics of the farms selected for modeling 136

Table 3. Technical coefficients for several modalities of a CA cropping system prototype including maize cultivation on a cover of Stylosanthes guianensis (weedkilled and resown every year). Level of fertilisation (N-P-K, per maize crop): F1: 23-0-0, F2: 69-15-25; F3: 115-37-50. Periods within year: T1: 01/03→15/04; T2: 16/04→15-/05; T3: 15/05→31/08; T4: 01/09→15/10; T5:16/10→28/02 136

Liste des encarts et figures

Encarts photographiques

Encart I-1. Diversité des contextes agraires incorporant une production de maïs sur pentes. 25

Encart I-2. Indices d'impact environnemental des systèmes de culture conventionnel à base de maïs sur pente. 30

Encart II-1. Exemple de prototype de système de culture. Maïs associé à du *Stylosanthes guianensis* (en haut, à gauche) en rotation bi-annuelle avec un manioc associé à du Stylosanthes guyanensis (en haut, à droite). Chaque année, la couverture est contrôlée mécaniquement (en bas à gauche, utilisation d'un rouleau à cornières de fabrication locale en traction animale) puis chimiquement. Une fois le mulch constitué, la plante commerciale et la plante de couverture associée y sont semés directement (en bas à droite), simultanément (en haut à droite) ou de façon décalée dans le temps (en haut à gauche, association au premier sarclage du maïs). 41

Figures

Figure I-1. Cadre général de la conception-évaluation de systèmes de culture. 20

Figure I-2. Carte pédologique (classification FAO, en haut) et géologique (en bas) des provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai. Les frontières des districts de Moc Chau, Mai Son et Van Chan sont représentées en rouge sur la carte pédologique. 23

Figure I-3. Carte des provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai (Nord Vietnam) : profondeur des sols (1), altitude (2), orientation principale des pentes (3) et pluviométrie moyenne (4). Les districts de Moc Chau, Mai Son et Van Chan sont représentés en rouge. 24

Figure I-4. Evolution relative des surfaces cultivées pour les principales cultures annuelles de la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011) 28

Figure I-5. Evolution relative de la production pour les principales cultures annuelles cultivées dans la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011) 28

Figure I-6. Evolution relative du rendement des principales cultures annuelles cultivées dans la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011) 28

Figure I-7. Evolution relative (en nombre d'animaux) du cheptel élevé dans la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011) 28

Figure I-8. Démarche générale de la thèse 32

Figure II-1. Objectifs, méthodes, et produits associés aux différentes phases de la démarche 34

Figure II-2. Représentation schématique des processus agronomiques impactant la productivité agricole des systèmes de culture en agriculture de conservation à court et long termes. 43

Figure III-1. Methodological framework to identify cropping systems, investigate the drivers of their diversity and assess their performances. Grey boxes correspond to steps. White boxes refer to inputs for a given step when associated to dashed arrows and to output from a given step when associated to plain arrows. 49

Figure III-2. Agroecological zones of Mai Son (left) and Moc Chau districts (right), location & main characteristics of surveyed communes / villages. 52

Figure III-3a. Projection of classes of categorical variables corresponding to maize cropping systems in the factorial plan of a multiple component analysis (F1 & F2). Stars localize types of cropping systems as identified from hierarchical clustering and arrows sub-types. Active variables with normal font (discs), supplementary ones in italics (squares), cropping systems (=CS) in capitals. 62

Figure III-3b. Projection of classes of categorical variables corresponding to maize cropping systems in the factorial plan of a multiple component analysis (F2 & F3). Stars localize types of cropping systems as identified from hierarchical clustering and arrows sub-types. Active variables with normal font (discs), supplementary ones in italics (squares), cropping systems (=CS) in capitals. 63

Figure III-4a. Classification tree model 1 describing cropping systems as a function of site-related factors. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. Splitting criteria is given below each node and selected modalities of criteria are given in child nodes. In terminal nodes are given node number, dominant cropping system, histograms representing frequency of each cropping system within the terminal node. TN = Terminal node, CS = Cropping System. 67

Figure III-4b. Classification tree model 2B describing cropping systems as a function of ethnicity and farm type. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. Splitting criteria is given below each node and selected modalities of criteria are given in child nodes. In terminal nodes are given node number, dominant class of cropping system, histograms representing frequency of each cropping system within the terminal node. TN= Terminal node, CS = cropping system..... 68

Figure III-4c. Classification tree model 3 describing cropping systems as a function of field biophysical conditions. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. TN= Terminal node, CS = cropping system. Position within the landscape: LL= lowland, FS = foot slope, SH = sloping hill, MS = mountainous slope; TS = top slope. 69

Figure III-4d. Classification tree model 4 describing cropping systems as a function of factors related to site, farm, farmer and field biophysical conditions. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. Splitting criteria is given before each node and selected modalities of criteria are given in child nodes. In terminal nodes are given node number, dominant class of cropping system, histograms representing frequency of each cropping system within the terminal node. TN= Terminal node, CS = cropping system. Position within the landscape: LL= Lowland, FS = foot slope, SH = sloping hill, MS = mountainous slope; TS = Top slope. 70

Figure III-5. Maize cultivation practices whose frequency significantly differed among districts (z test, p=0.01) within our sample of maize fields surveyed (Mai Son: n=275; Moc Chau: n=395). 71

Figure III-6. Position of all cropping systems on scatter plots representing return to input costs computed against return to land (left – Fig. III-6a) and return to labor (right – Fig. III-6b). Regression for cropping system 1.2 and 3.2 are represented by plain / dotted lines 73

Figure III-7. Position of all cropping systems on scatter plots representing return to input costs computed against maize-related farm gate N balance (left – Fig. III-7a) and K2O balance (right – Fig. III-7b). Regression for cropping system 1.2 and 3.2 are represented by plain / dotted lines 73

Figure III-8. Intensity of resource use, environmental vulnerability and productivity of maize cropping systems. Cropping systems of a given type are represented on the same graph. Plain, dashed and dotted lines differentiate cropping system subtypes and sub-subtypes. Axis scales are reported in brackets below each indicator name. Minimum values are located at the center of the graph and maximum values at the opposite position of each axis. Reference threshold values are indicated using a triangle on the corresponding axis. 75

Figure IV-1 Location and main characteristics of the three demonstration sites in the mountainous Northern Vietnam (2010-2012): Chieng Hac, Phieng Luong, and Suoi Giang. 88

Figure IV-2 Typical design of the demonstration sites. CONV : tilled cropping systems without cover plant. CA : No-till cropping systems with cover plant as a relay cropping for commercial crop. 89

Figure IV-3. Representation over 2 years of four demonstrated CA systems (no-tillage and cover plants as a relay cropping) and their equivalent under conventional agriculture (tillage and no association of cover plants) demonstrated at the three sites. For CA systems, cover plants were weed-killed then mulched every year prior to the beginning of the cropping season for the direct seeding of the subsequent crop. 93

Figure IV-4. Coefficients of variation for maize yields corresponding to the variability associated with rotational options, slope positions, and sites, compared for CONV and CA at F1 and F2, the first and second year of demonstration implementation. 96

Figure IV-5. Maize grain yields computed against N fertilisation rates compared between demonstrations sites (CA and CONV) and neighbouring farmers fields (CONV). Values for farmer fields refers to cropping seasons 2012 (Suoi Giang) and 2011 (Phieng Luong and Chieng Hac). Values for demonstration sites refers to the second year of demonstration. At Suoi Giang, the plotted values corresponds to the cumul of two crops within one year. CH: Chieng Hac; PL: Phieng Luong; SG: Suoi Giang; CA: Conservation Agriculture; CONV: Conventional Agriculture. 97

Figure IV-6. Labour use over two years (cumulated number of working days) compared between two-year rotation option and number of maize cropping seasons per year 98

Figure IV-7. Annual return to land computed against annual return to production costs compared between demonstrations sites and neighbouring farmers fields. Values for farmer fields refers to cropping seasons 2012 (Suoi Giang) and 2011 (Phieng Luong and Chieng Hac). Economic values at demonstration sites were averaged to one year from the whole two year crop sequence. CH: Chieng Hac; PL: Phieng Luong; SG: Suoi Giang; CA: Conservation Agriculture; CONV: Conventional Agriculture. Demo = demonstration site; Farmer = Farmer field. 101

Figure V-1 Insertion historique de dispositifs matriciels de conception-démonstration-formation dans une démarche globale de recherche développement selon Séguy et al. (1996, 2001)..... 121

Figure V-2 Perspective d'utilisation de dispositifs matriciels de creation-formation-diffusion dans une démarche de couplage à des modèles de ferme et de culture 122

Figures annexes

Fig. 1. Representation of a conservation agriculture based prototype of cropping system (maize monocropping on a cover of stylosanthes weedkilled and resown every year. 137

Fig. 2a. Simulated CA conversion rate for diverse timelines of farm income maximisation (Ta So village of Chieng Hac commune) 140

Fig. 3a. Sensitivity analysis to maize price of simulated CA conversion rate under maximisation of farm income over 2 years (Ta So village) 140

Fig. 2b Simulated CA conversion rate for diverse timelines of farm income maximisation (Tin Toc village of Phieng Luong commune) 140

Fig. 3b. Sensitivity analysis to maize price of simulated CA conversion rate under maximisation of farm income over 2 years (Tin Toc village) 140

Fig. 2c. Simulated CA conversion rate for diverse timelines of farm income maximisation (Pieng Lan village of Chieng Hac commune) 140

Fig. 3c. Sensitivity analysis to maize price of simulated CA conversion rate under maximisation of farm income over 2 years (Pieng Lan village) 140

Figures 4a (top) and 4b (bottom). Simulated CA conversion rates for farms Tin Toc B (top) and Ta So C (bottom) according to the timeline considered for farm income maximisation and the coefficient k2 representing the amplitude of cumulated negative impact of continuous tillage on crop yields 141

Figure 5a (top) and 5b (bottom). Simulated CA conversion rate upon a 5 year profit maximisation for farms Tin Toc B (top) and Ta So C (bottom) considering different values of k1 and k2, respectively representing the amplitude of cumulated impact over time of CA and conventional agriculture on crop yields (Alternative scenario). 143

Résumé

Pour faire face aux transitions démographiques et alimentaires en cours, une intensification des systèmes agricoles est nécessaire. Ceci génère des questions quant à la nature des systèmes à concevoir et sur les conditions de leur acceptabilité économique et sociale. Ces questions sont plus particulièrement cruciales dans des contextes de petite agriculture familiale et de pression élevée sur les ressources naturelles, dont les zones tropicales humides d'Asie constituent un exemple typique. Dans cette région, l'agriculture de conservation est considérée par différents acteurs de la recherche agronomique et du développement rural comme un moyen de parvenir à une intensification durable de l'agriculture.

Dans ce contexte, notre travail avait pour objectif général d'évaluer dans quelle mesure l'agriculture de conservation peut constituer une réponse efficace au plan agronomique et adaptée aux contraintes et besoins de petits producteurs familiaux dans une région montagneuse caractérisée par une forte pression sur les ressources naturelles et un taux de pauvreté élevé.

Nous avons d'abord effectué un diagnostic des facteurs critiques de durabilité associés à la diversité des systèmes agricoles conventionnels sur pente. Pour ce faire, nous avons développé une approche originale combinant différentes méthodes d'analyse multivariée et de classification. Cette approche appliquée au cas de la production de maïs sur pentes nous a permis d'identifier 5 types de systèmes de production et 7 types de systèmes de cultures aux performances contrastées en termes d'atteinte d'objectifs de durabilité.
Les caractéristiques territoriales à différentes échelles, de l'écorégion au village, ont été identifiées comme prévalant sur les caractéristiques biophysiques des parcelles et l'accès aux moyens de production à l'échelle de l'exploitation pour expliquer la diversité des systèmes de culture sur pentes. Améliorer simultanément la productivité agricole et la rentabilité économique des systèmes de cultures semble réalisable. Nous avons toutefois identifié la nécessité de compromis entre rentabilité économique et pression sur l'environnement.

Nous avons ensuite exploré dans quelle mesure des données collectées sur des sites de démonstration (matrices de création-formation-diffusion) pouvaient être utilisées pour déterminer la capacité de l'agriculture de conservation à être plus productive et plus rentable que l'agriculture conventionnelle dans un horizon de deux années. Dans le contexte spécifique des séquences site-climat considérées, l'agriculture de conservation pratiquée à un niveau de fertilisation suffisant n'a pas eu d'impact négatif sur les rendements la première année après conversion. L'agriculture de conservation a significativement amélioré productivité et efficacité agronomique la seconde année après conversion. Toutefois, cette amélioration des performances agronomiques n'était pas suffisante, aux conditions économiques actuelles, pour assurer une meilleure rentabilité économique que l'agriculture conventionnelle sur un horizon de deux ans, du fait de l'augmentation des coûts de production associée au passage à l'agriculture de conservation.

Au-delà de ces résultats, notre travail questionne la façon dont des dispositifs de création-diffusion en agriculture de conservation, actuellement sous-exploités au plan scientifique, peuvent être mis à profit pour contribuer (i) d'une part à l'analyse des processus à l'origine des performances agronomiques et économiques des systèmes de culture, (ii) et d'autre part à l'analyse de la variabilité des performances agro-économiques des systèmes de culture dans différents contextes biophysiques et économiques.
Les contraintes opérationnelles et les objectifs de démonstration sous-jacents à ce type de dispositif limitent les possibilités d'amélioration de leur organisation pour en faire des dispositifs d'expérimentation agronomique parfaitement valides au plan statistique. Utiliser les données issues de tels dispositifs dans une perspective de modélisation constitue en revanche une option privilégiée pour améliorer leur contribution à la connaissance scientifique. Dans ce cadre, le développement de modèles bioéconomiques de fermes intégrant divers horizons de décision stratégique associés aux différentiels de dynamiques de performances entre systèmes conventionnels et en agriculture de conservation constitue une voie prometteuse pour réaliser une évaluation *ex-ante* de l'attractivité économique de l'agriculture de conservation pour de petits producteurs familiaux.
Les autres perspectives scientifiques issues de ce travail de thèse incluent une évaluation de la variabilité interannuelle des performances des systèmes de culture intégrant certains impacts environnementaux, ainsi que l'évaluation de la capacité de l'agriculture de conservation à tamponner cette variabilité.

Enfin, ce travail scientifique a diverses implications pratiques pour une intensification agricole durable dans les zones de montagnes du Nord Vietnam. Les typologies de systèmes agricoles et l'analyse comparative des performances de l'agriculture conventionnelle et de l'agriculture de conservation à l'échelle du champ cultivé permettent d'élaborer de nouvelles hypothèses sur les contraintes à intégrer dans le prototypage de systèmes de culture innovants, la nature des exploitations à cibler prioritairement pour la diffusion de tels systèmes et les stratégies à mettre en œuvre pour en faciliter la diffusion. Dans ce contexte, une hypothèse majeure est qu'il est nécessaire d'envisager la valorisation au moins partielle des plantes de couverture, une conversion par étapes et/ou des incitations permettant de compenser l'augmentation de coûts générée par le passage à l'agriculture de conservation pour que celle-ci devienne économiquement attractive pour de petits producteurs familiaux dans un horizon de deux années.

***Ex-ante* agronomic and economic assessment of cropping systems under smallholder farming: The case of conservation agriculture in mountainous humid tropics (Northern Vietnam)**

Abstract

Further agricultural intensification is expected to meet the on-going demographic transition and changes in consumption habits. There is therefore a need to identify contexts, options and conditions for intensive but sustainable land uses to develop. This question is of particular importance under contexts of smallholder farming and pressure on natural resources, such as in Asian humid tropics, where conservation agriculture (CA) is considered by several authors a leeway for sustainable intensification of agriculture. Within this context, our work aimed at preliminary assess to which extent CA fits the needs and constraints of smallholder farmers in a mountainous region where the high level of pressure on natural resources adds-up to a high poverty rate.

We firstly implemented a diagnosis of sustainability gaps associated with the regional diversity of agricultural systems. To do so, we applied an original methodological approach combining diverse classification tools to maize based agricultural systems on sloping land. We identified 5 farm types and 7 maize cropping systems types, strongly contrasted in terms of management practices, performances and sustainability issues. The local diversity in maize cropping systems resulted from multi-scale interactions between territory-related factors, farm/farmer characteristics and field biophysical conditions. Within the context of our study, territory-related factors were of prevailing importance over plot biophysical conditions and farm/farmer related characteristics to drive diversity of cropping systems. Increasing economic profitability and agronomic productivity were compatible goals. However, tradeoffs were detected between economic profitability and mining of soil fertility.

We subsequently investigated to which extent data collected at demonstration sites under project management can be used to determine whether CA has chance to become more productive and profitable over a 2-year period. Within the context of our study, CA associated with sufficient fertilization levels did not depress yields the first year after conversion. The second year, CA significantly increased maize productivity and agronomic efficiency. Such improvement of agronomic performances was not sufficient to ensure better economic performances than conventional agriculture over two years, due to the increase in production costs associated with transition to CA.

Beyond those specific results, our work questions how CA-demonstrations setup by development project can provide valuable contribution to (i) the analysis of process driving agronomic and economic performances of demonstrated cropping systems and (ii) the investigation of cropping system agronomic and economic performances across variations in biophysical and economic conditions. Operational constraints and underlying demonstration goals limit possibilities to improve demonstration design. Coupling demonstration with modeling therefore appears the most effective way to improve scientific output from such demonstrations. Bio-economic farm model would therefore allow refining *ex-ante* investigation of CA economic attractiveness for smallholder farmers considering diverse decision timelines and differentiated dynamics of cropping system performances over time.

Other scientific perspectives include the assessment of inter-annual variability in cropping system performances, including environmental outputs and the investigation of capacity of conservation agriculture to buffer this variability.

Last, our results have practical implications for sustainable agricultural intensification in tropical humid highlands of Vietnam. Typologies of agricultural systems and field-scale analysis of cropping system performances allow building new assumptions for further cropping system prototyping and farm systems to be targeted in CA extension. To make conversion to CA worth for farmers within a period of two years, a major assumption is the requirement for cover plant valorisation, implementation of stepwise transition to CA, and/or tailoring incentives to support smallholder farmers in overcoming costs associated with conversion to CA.

Introduction générale

1. La nécessité d'une intensification agricole accrue pour répondre à l'évolution de la demande alimentaire

Les mutations agraires associées à l'intensification de la production agricole, aux changements démographiques et aux modifications des habitudes de consommation ont progressivement fait émerger des préoccupations relatives à la durabilité des agrosystèmes pluviaux. Dans les zones tropicales humides d'Asie, la dégradation des ressources naturelles associée à des modes de mise en valeur agricole non durables (Alauddin and Quiggin, 2008; Valentin et al., 2008) atteint une dimension critique compte tenu du poids démographique de cette région, de la prévalence de l'agriculture familiale, de son niveau de pauvreté élevé et de l'intensité de la pression sur les ressources en sol et en eau.
Une augmentation de la production agricole globale est attendue au cours des prochaines décennies pour faire face à l'augmentation de la demande alimentaire tirée par la croissance démographique mondiale. Différents scénarios ont été avancés quant aux transformations agraires impliquées et leur répartition régionale (Dorin et al., 2009; FAO, 2002). Quel que soit le scénario considéré, la plupart des auteurs convergent sur l'idée qu'une augmentation de la production agricole nécessitera une poursuite de l'intensification de la production en plus de l'expansion des surfaces cultivées (Dorin et al., 2009; FAO, 2002; Gregory et al., 2002; Hahn, 1995; Keys and McConnell, 2005) Une transition écologique intégrée à cette intensification apparait de ce fait nécessaire pour en réduire l'impact environnemental.

2. L'agriculture de conservation (AC), une opportunité d'intensification durable de la production agricole ?

La nécessité d'une intensification agricole accrue met en tension la dimension productive des agroécosystèmes et les autres attributs de leur durabilité. Elle implique une adaptation des producteurs à un nouveau paradigme : produire tout en préservant les fonctions écologiques à l'origine d'un ensemble de services écosystémiques dépassant la seule production. Elle génère un besoin d'innovations sociotechniques compatibles avec l'intensification écologique (Dore et al., 2011) permettant notamment aux acteurs ruraux d'anticiper les dynamiques en cours, de s'adapter aux changements et de piloter les agro-écosystèmes de manière durable. La nature des innovations à construire, la façon de les concevoir, le type de modèle agricole à promouvoir sont autant de problématiques transverses des contextes locaux. Dans cette perspective, la conception-évaluation de systèmes de culture durables constitue un cadre d'innovation partagé par les agronomes et les agents de développement.
L'agriculture de conservation regroupe un ensemble de pratiques culturales répondant à 3 critères : perturbation minimale du sol, couvert végétal permanent et diversification des systèmes de culture s'appuyant sur des successions ou associations culturales (FA0, 2008). Différents auteurs voient dans l'agriculture de conservation une opportunité d'innovation pour intensifier durablement la production agricole. Elle constitue un concept attractif du fait de la diversité des services écosystémiques qu'elle est susceptible de rendre (Derpsch et al., 2010; Kassam et al., 2012; Kassam et al., 2009), incluant, sur le long terme, l'augmentation et la stabilisation des rendements (Kassam et al., 2009; Ngwira et al., 2012; Nyamangara et al., 2013a; Thierfelder et al., 2013), en lien avec une amélioration de la fertilité des sols (Kumar and Goh, 1999; Nyamangara et al., 2013a; Thierfelder et al., 2013), résultant d'une séquestration accrue du carbone (Chivenge et al., 2007; Corsi et al., 2012), et de l'effet à long terme d'une réduction immédiate et durable de l'érosion et du ruissellement (Derpsch et al., 1986; Schuller et al., 2007; Shipitalo and Edwards, 1998; Wilson et al., 2008).

L'impact à long terme de l'usage d'herbicides pour le contrôle des couvertures reste toutefois controversé (Scopel et al., 2013).
L'agriculture de conservation est aujourd'hui pratiquée sur plus de 120 millions d'hectares dans le monde (Derpsch et al., 2010; Kassam et al., 2009). Cependant, la plus grande partie de cette surface est mise en culture par des exploitations mécanisées de taille importante. L'extension de l'agriculture de conservation en agriculture familiale reste limitée (Giller et al., 2011; Giller et al., 2009; Lienhard, 2013).
Dans de tels contextes, diverses contraintes à son adoption ont été rapportées. Ces contraintes sont principalement liées à la période de transition avant que les systèmes en agriculture de conservation ne soient pleinement viables au plan socio-économique (Erenstein, 2003). A l'échelle du champ cultivé, la principale contrainte est un risque de perte de rendement à court terme en l'absence d'ajustement de la fertilisation (Giller et al., 2009). A l'échelle de l'exploitation, ces contraintes comprennent (i) une augmentation des coûts de production (ii) des modifications dans l'organisation du travail, (iii) la nécessité d'équipements adaptés et de semences additionnelles, (iv) ainsi que les arbitrages entre différents usages de la biomasse végétale qui constitue un enjeu multifonctionnel clé (Affholder et al., 2010; Erenstein, 2003; Giller et al., 2009; Greiner et al., 2009; Knowler and Bradshaw, 2007; Lafond et al., 2009; Naudin, 2012; Wall, 2007). A l'échelle du terroir villageois, le passage à l'agriculture de conservation peut par ailleurs nécessiter la négociation de nouvelles règles de gestion de l'espace hors des périodes habituelles de culture (Martin et al., 2004).
La mise au point d'options appropriables par de petits producteurs familiaux, et l'évaluation des contextes et options la rendant envisageable à différents horizons temporels, constituent de ce point de vue deux questions essentielles de recherche pour le développement.

3. Objectif général et contexte

Dans ce contexte, cette thèse a pour objectif principal de déterminer les contextes dans lesquels des systèmes de culture en agriculture de conservation constituent une forme d'innovation *a priori* attractive économiquement à court terme pour de petits producteurs en zone tropicale humide de montagne.

4. Cadre institutionnel et scientifique

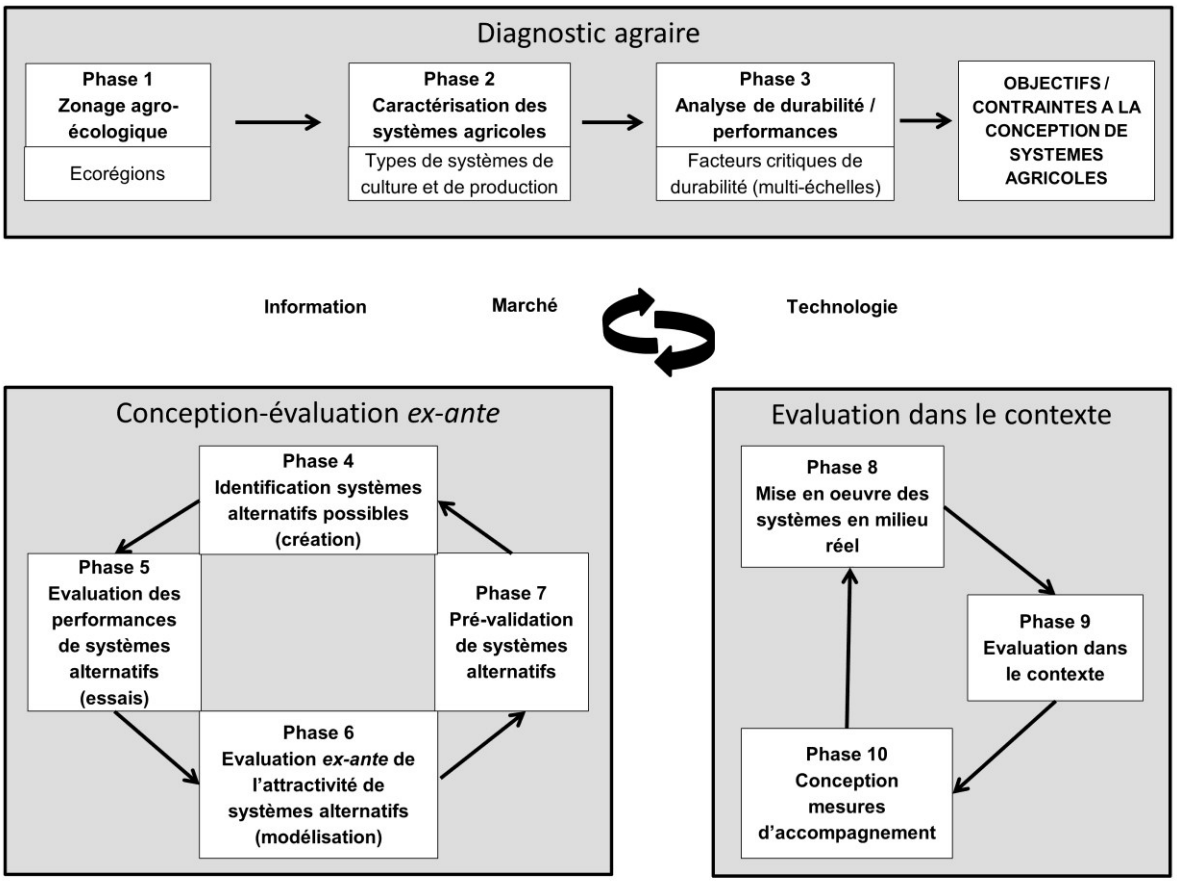
Cette thèse a été financée par l'AFD à travers le projet ADAM (www.adam-project-vietnam.net), le CIRAD-URSIA (www.cirad.fr et www.agroecologie.cirad.fr), le réseau CANSEA (http://cansea.org.vn, et le Programme d'Appui Multi Pays Agroécologie à travers le programme de recherche RIME 3. Elle s'intègre aux recherches conduites par le CIRAD et le NOMAFSI au Vietnam, visant à concevoir des systèmes de culture pour permettre une intensification durable de l'agriculture dans les zones de montagnes. Une partie des résultats obtenus ont été présentés dans le cadre de la troisième conférence internationale sur l'agriculture de conservation en Asie du Sud-Est http://www.conservation-agriculture2012.org/

Chapitre I. Contexte et problématique

1. Objectif général du travail de recherche

Notre travail s'insère dans une démarche générale de conception-évaluation de systèmes de culture durables en agriculture familiale au Sud (Figure I-1).

Figure I-1. Cadre général de la conception-évaluation de systèmes de culture.



Notre travail traite spécifiquement du diagnostic des systèmes agricoles à une échelle régionale exploratoire (phases 1 à 3) et de l'évaluation préliminaire de prototypes de systèmes de culture conçus pour intensifier durablement la production agricole (phase 5).
Nous avons pour objectif général de déterminer les contextes dans lesquels des systèmes de culture en agriculture de conservation constituent une forme d'innovation *a priori* attractive économiquement à court terme pour de petits producteurs en zone tropicale humide de montagne.
Le terme d'agriculture de conservation renvoie à une gamme de systèmes de culture de nature diverse selon les auteurs (Erenstein, 2003; Kassam et al., 2009). Nous l'avons utilisé au sens de la FA0 (2008) qui définit l'agriculture de conservation par (a) une perturbation minimale du sol (b) un couvert végétal permanent et (c) une diversification des systèmes de culture s'appuyant sur des successions ou associations culturales.
Notre étude se situe dans le contexte de l'agriculture familiale en zones de montagne du Nord Vietnam, où l'extension rapide de la monoculture de maïs labouré sur pentes en réponse à la demande croissante du marché pour l'alimentation animale génère des préoccupations croissantes quant à la durabilité des agro-écosystèmes (Clemens et al., 2010; Valentin et al., 2008; Vezina et al., 2006). Dans cet espace, l'agriculture de conservation est envisagée comme une alternative pour réduire l'impact environnemental de l'agriculture sur pentes.

Ce travail a trois objectifs spécifiques :

Objectif 1 : Analyser les performances agronomiques, économiques et environnementales des systèmes agricoles présents dans une région présentant une forte hétérogénéité biophysique et socio-économique afin d'identifier les niches dans lesquelles l'agriculture de conservation est potentiellement adéquate pour répondre aux enjeux de durabilité.

Objectif 2 : Evaluer si l'évolution à court terme des performances agronomiques de l'agriculture de conservation est suffisante pour amener de petits producteurs familiaux à la considérer comme une opportunité économiquement attractive

Objectif 3 : Déterminer les conditions dans lesquelles des dispositifs de démonstration-formation mis en place pour promouvoir l'agriculture de conservation peuvent être également mobilisés pour une évaluation scientifique des performances de ces systèmes.

2. Contexte

2.1. Une région caractérisée par une très forte hétérogénéité biophysique

La région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam s'étend sur 9,5 millions d'hectares, dont 5,7 millions d'hectares sont classés en terres de production forestière et seulement 1,6 millions d'hectares correspondent à des terres agricoles. Un tiers seulement de la surface agricole totale est utilisable pour la culture du riz, un autre tiers correspondant à des zones de pentes, ce qui constitue un indicateur de l'importance de la mise en valeur des pentes pour les foyers ruraux.
La population de cette région comprenait 11,2 millions de personnes en 2011, se répartissant en 36 groupes ethniques (GSO, 2013). La densité de population correspondante (118 hab.km-2 en 2011) est 4 fois supérieure au seuil considéré comme compatible avec le maintien de l'agriculture sur brûlis (Castella, 2012).
Les districts ruraux montagneux des districts de Van Chan (Province de Yen Bai), Moc Chau et Mai Son (Province de Son La) peuvent être considérés comme représentatifs de l'hétérogénéité des conditions biophysiques et socio-économiques qui prévalent dans cette région.
Les sols les plus fréquents dans ces trois districts appartiennent à la famille des ferralsols et des acrisols (Figure I-2). On observe toutefois localement une grande diversité de sols en fonction de la nature de la roche mère, des conditions locales de pédogenèse, et la position dans la topo-séquence (Clemens et al., 2010).
Les sols peuvent schématiquement être catégorisés comme suit :

- sols jaunes (en bas de pente) à rouge (sur la pente) présentant une fertilité chimique restreinte (sols acides à forte toxicité aluminique), mais généralement profonds et relativement aisés à travailleur. Leur perméabilité dépend en particulier de l'état de surface (couverture végétale, encroûtements, etc.). Les modes de mise en valeur de ce type de sols comprennent aussi bien des cultures annuelles pluviales (principalement maïs, marginalement riz pluvial et manioc) que des cultures pérennes (thé ou café) ;
- sol bruns à marron sur roche mère basique (schistes calcaires ou roches métamorphisées) présentant des propriétés chimiques favorables (CEC élevée, acidité limitée) et des propriétés physiques très diverses. Ils sont essentiellement mis en valeur avec des cultures annuelles pluviales (principalement maïs, plus rarement manioc ou riz pluvial);

- sols alluviaux dont les propriétés physicochimiques dépendent principalement du matériau emmené par les eaux et qui présentent une grande diversité de modes de mise en valeur (arboriculture, maraichage, riz irrigué, maïs, canne à sucre, etc.);
- lithosols divers, basiques ou acides, qui présentent des propriétés chimiques très diverses et des propriétés physiques très contraignantes. Ce type de sol est essentiellement mis en valeur avec des plantations forestières, plus marginalement en culture de maïs ou de manioc.

Les sols présentent par ailleurs une profondeur moyenne variable (Figure I-3-1), avec des situations locales très différenciées selon le type de sol et l'état d'avancement des processus d'érosion.

L'altitude varie de 50 à 2469 m (Figure I-3-2). Les différences d'altitudes se traduisent par un étagement relatif des cultures pérennes (café arabica en dessous de 900 m à Mai Son, pruniers, abricotiers et pêchers en dessous de 1000 m à Moc Chau, pruniers uniquement au-dessus de cette altitude). L'altitude génère diverses contraintes pour les cultures annuelles. La précocité du semis du riz irrigué dépend par exemple directement de l'altitude (Montagne, 2008). La double culture de maïs au cours de l'année n'est possible qu'en dessous de 800 m.

Le paysage est contrasté. Il s'organise principalement autour de topo-séquences cultivées, (Encart I-1), comprenant :

- quelques zones plates (plaines de basses et moyenne altitude à Mai Son et Van Chan, plateau de haute altitude à Moc Chau) ;
- des vallées étroites ou larges, qui peuvent être sèches ou irrigables. Dans ce dernier cas, la largeur des vallées est un facteur déterminant de l'extension des périmètres rizicoles irrigués ;
- surmontées de pentes fortes collinaires ou montagneuses (Figure I-3-3).

La pluviométrie annuelle moyenne est de 1 600 mm (Figure I.3-4) ; elle présente une distribution unimodale, avec une saison chaude et pluvieuse d'Avril à Octobre et une saison froide et sèche de Novembre à Mars.

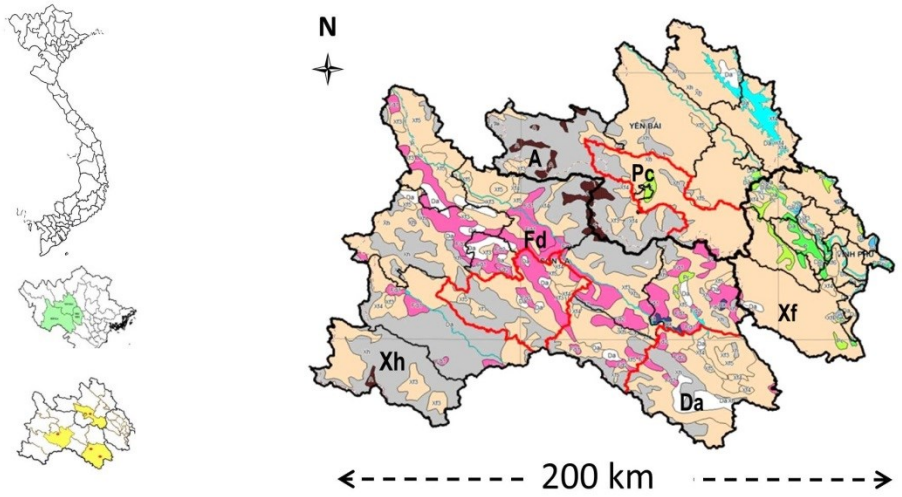
La densité de population moyenne est importante (de 70 hab.km-2 à Moc Chau à 120 hab.km-2 à Van Chan). La population est répartie de façon inégale entre les villages, principalement en fonction de leur facilité d'accès en lien avec les conditions biophysiques.

La mise en valeur agricole des pentes est dominée par la culture du maïs (*Zea mays L.)* pour l'alimentation animale. Principale culture commerciale de la région, le maïs occupe de un à trois cinquièmes de la surface totale cultivée selon le district. Les cultures secondaires comprennent le manioc (*Manihot esculenta C*.) dans l'ensemble des districts et le canna (*Canna edulis*) à Moc Chau. Les cultures pérennes, qui présentent une extension limitée, sont à un moindre degré également cultivées sur les pentes. Elles incluent le thé à Moc Chau et à Van Chan ainsi que le café à Mai Son.

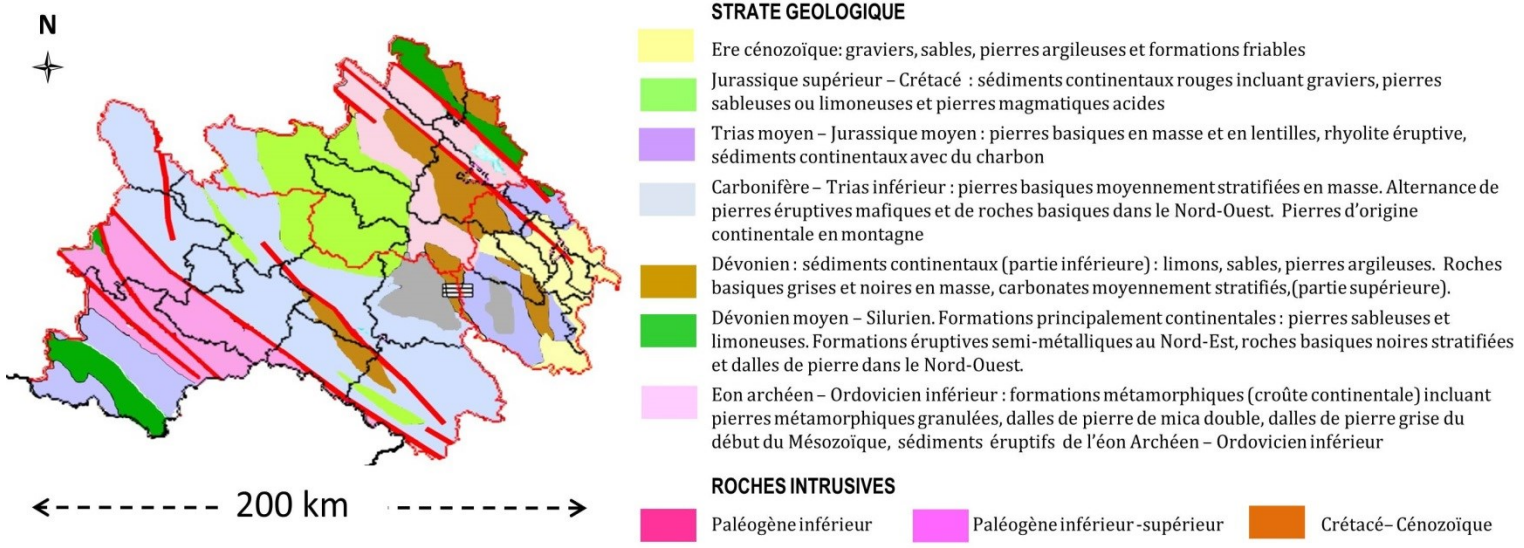
La plupart des exploitations familiales disposent d'ateliers d'élevage de petite taille (volaille et porcins) à visée d'autoconsommation et de vente dans des proportions diverses.

La détention d'animaux de traction animale (buffles à proximité des périmètres irrigués, bovins de trait ou chevaux) constitue un facteur de différenciation des exploitations dans les villages situés dans des zones de production de cultures annuelles.

Figure I-2. Carte pédologique (classification FAO, en haut) et géologique (en bas) des provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai. Les frontières des districts de Moc Chau, Mai Son et Van Chan sont représentées en rouge sur la carte pédologique.



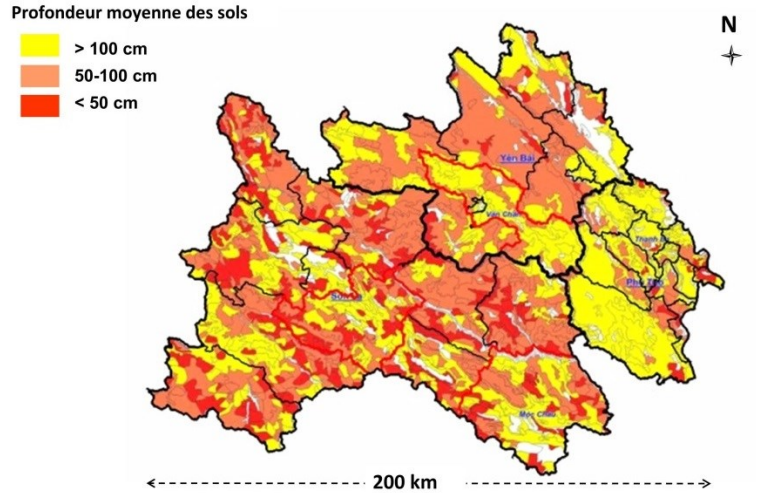
Adapté depuis la carte des sols du Vietnam (1:1 000 000), Soil and Fertilizer Research Institute, Ha Noi.



Adapté de la carte géologique du Vietnam (1 : 6 000 000), auteur inconnu

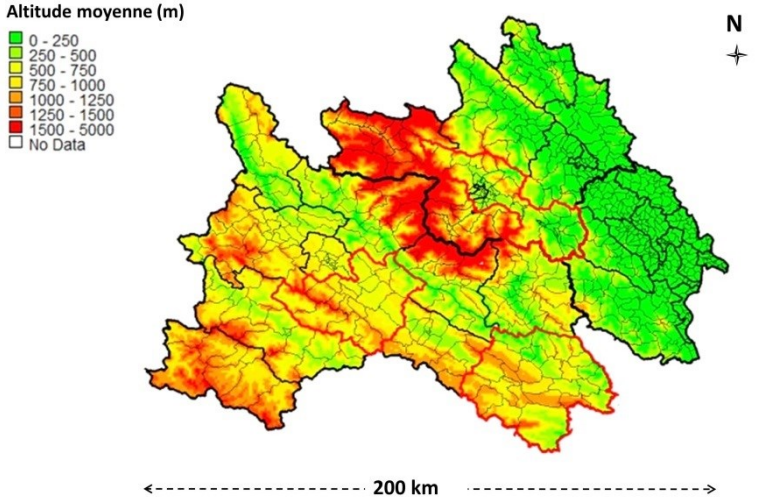
Figure I-3. Carte des provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai (Nord Vietnam) : profondeur des sols (1), altitude (2), orientation principale des pentes (3) et pluviométrie moyenne (4). Les districts de Moc Chau, Mai Son et Van Chan sont représentés en rouge.

Profondeur moyenne des sols dans les provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai (1)



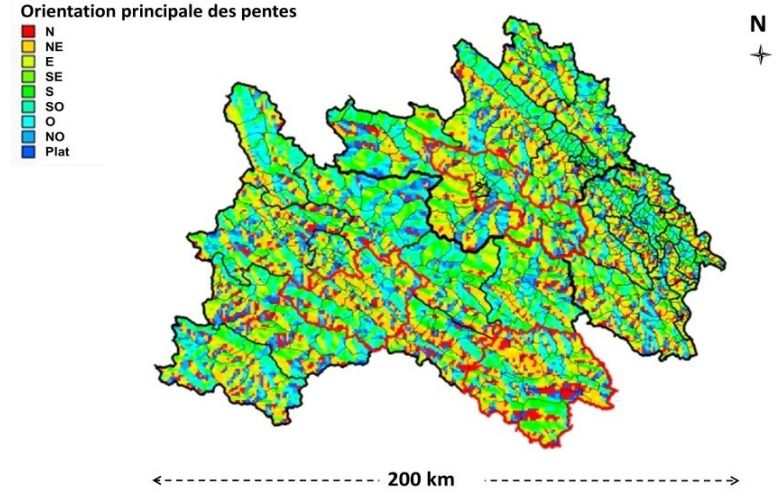
Source: Dang Dinh Quang, 2010

Altitude moyenne dans les provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai (2)



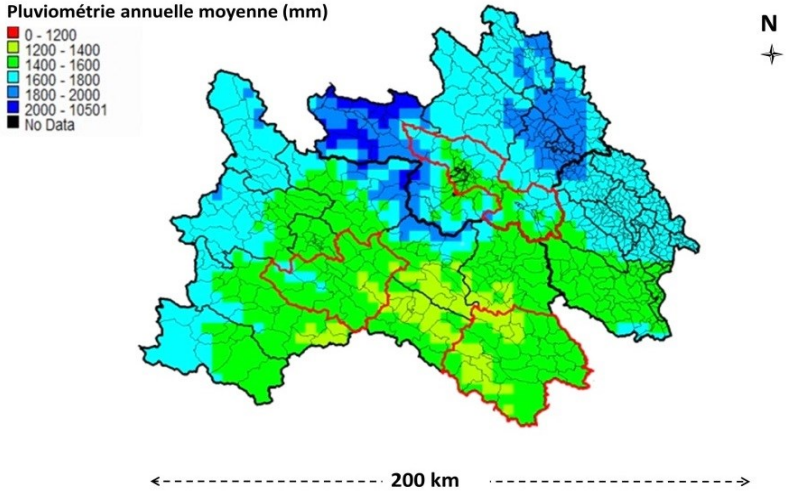
Source : SRTM 90m Digital Elevation Data v4, CGIAR, 2008

Orientation principale des pentes dans les provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai (3)



Source : SRTM 90m Digital Elevation Data v4, CGIAR, 2008

Pluviométrie moyenne dans les provinces de Phu Tho, Son La et Yen Bai (4)



Source : Hijman et al., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology 25: 1965-1978*.

Encart I-1. Diversité des contextes agraires incorporant une production de maïs sur pentes.

Plaine rizicole irriguée à 2 cultures par an (premier plan) surmontée de collines labourées pour la culture du maïs

Huaswirth D. Yen Chau (Son La), 04/2010

Plaine rizicole irriguée surmontée de systèmes de culture diversifiés sur les pentes: cultures annuelles (maïs, manioc, riz pluvial), plantations de thé et plantations forestières. A l'arrière plan, sommets dénudés pour l'agriculture pluviale.

Ha Dinh Tuan, Van Chan (Yen Bai), 03/2008

Collines dégradées labourées pour le semis du maïs, en surplomb de casiers rizicoles inondés d'extension limitée.

Hauswirth D. Moc Chau (Son La), 02/2010

Toposéquence montagneuse cultivée de façon presque exclusive en monoculture de maïs sur pente

Hauswirth D., Mai Son (Son La), 07/2011

Terrasses rizicoles irriguées surmontées de plantations de thé et de plantations forestières (avant-plan). A l'arrière-plan, parcelles de pentes brûlées pour l'installation de cultures pluviales

Hauswirth J.-M., Yen Bai, 04/2013

2.2. Une intégration au marché récente accompagnée d'une intensification rapide de la production agricole

2.2.1. La ré-émergence du secteur privé sous contrôle de l'Etat (1990-2000)

Le démantèlement des coopératives collectivistes acté par le décret 100 (1988) dans le cadre de la politique du *doi moi* s'est poursuivi par un processus de redistribution foncière qui s'est opéré à l'échelle des villages. La redistribution foncière a surtout concerné les zones de production rizicoles et dans une moindre mesure les bas de pente. En conséquence, la date d'établissement dans le village et les capacités de travail des foyers pour défricher et mettre en culture de nouvelles surfaces, sont rapidement devenues les facteurs clés de la différentiation des systèmes de production dans la première moitié des années 1990.

Un ensemble de lois de politique rurale volontariste ont été promulguées au début des années 1990, permettant aux producteurs de regagner progressivement le contrôle des moyens de production. Elles incluent la loi foncière (1993) et le décret 02-CP (1994), qui ont ratifié le processus de redistribution foncière en allouant aux producteurs des titres fonciers tout en définissant une limite théorique à la quantité de terre pouvant être allouée à un individu unique (Marsh et al., 2006). Un marché privé des intrants et produits agricoles s'est progressivement reconstruit.

Fondée en 1990, la Banque Vietnamienne pour l'Agriculture a contribué à favoriser progressivement l'accès au capital en procurant du crédit aux producteurs familiaux. Basé sur l'usage des titres fonciers comme garantie collatérale, les sources de crédit formel se sont rapidement diversifiés entre 1995 et 2000, à travers les Unions de Masse, l'établissement de la Banque Vietnamienne pour les Pauvres, puis les banques privées (Wolz, 1999).

Une succession d'innovations techniques se sont également diffusées au cours de cette période. Des variétés améliorées de riz et de maïs à cycle court ont d'abord été introduites, permettant le développement de la double culture dans les zones de faible altitude. Les cultures fruitières pérennes (pruniers) ont été favorisées en substitution au pavot, interdit par la Constitution Vietnamienne depuis 1992.

La pression démographique, les innovations techniques et les changements impulsés par les politiques rurales ont débouché sur une forte réduction des durées de jachère et sur des dynamiques de défriche forestière rapide. Face à la réduction particulièrement rapide des surfaces en forêts, avec un minimum atteint en 1993-1994, les décideurs politiques ont pris conscience du caractère limité des ressources naturelles utilisées pour impulser le développement économique (Castella, 2012). Le brûlis et l'interdiction de la coupe des arbres ont été imposés en 1991, et des programmes de replantation forestière pour la protection ou la production ont été mis en œuvre à partir de 1994 (Clement, 2008).

A partir de 1995, la production de maïs sur pente a été stimulée par trois facteurs : l'augmentation de la demande des usines de transformation en alimentation animale, l'introduction de cultivars à haut rendement, et un accès aux intrants facilité par des intermédiaires assurant l'approvisionnement en intrants en contrepartie de la vente de la production à l'issue de la campagne agricole. Auparavant restreints aux espaces les plus plats, le travail du sol en traction animale et l'application d'engrais minéraux se sont alors rapidement propagés sur les pentes.

Du fait d'opportunités limitées de revenu non agricole, l'accès aux innovations techniques, au capital et aux débouchés commerciaux ont été des facteurs essentiels de la différenciation des systèmes de production à l'échelle des villages à la fin des années 1990 (Pham Manh et al., 2003).

Des schémas différenciés de développement des villages s'observent également à cette période, en fonction de leurs ressources foncières (proportion relative de terres de pente et de terres plates), des institutions en régulant l'usage, et du degré d'accessibilité qui conditionne pour partie les opportunités de développement économique (Castella et al., 2005).

2.2.2. Une intégration croissante au marché (2000 - 2012)

Au cours de la dernière décennie, les paysans ont bénéficié d'une diversification des opportunités économiques conjuguée à une exposition plus marquée aux marchés nationaux et internationaux (adhésion du Vietnam à l'OMC en 2006).

Les politiques rurales mises en œuvre au cours de la dernière décennie ont favorisé la mise en place et le renforcement d'un nombre restreint d'entreprises agroindustrielles privées ou à capitaux mixtes, assurant la gestion et l'encadrement de la production agricole, la transformation post-récolte et la commercialisation. Ces structures sont localisées dans des zones délimitées, qui correspondent la plupart du temps à du foncier précédemment géré par des fermes d'Etat durant la collectivisation. Ceci se traduit par la coexistence au sein de l'espace rural de paysans fortement intégrés -en particulier pour la production d'hévéa, de canne à sucre, de thé ou l'élevage laitier- et d'une majorité de paysans indépendants, comme les producteurs de maïs sur pentes, qui mettent en valeur des terres au potentiel agronomique moindre ou présentant de plus fortes contraintes. Ces derniers bénéficient d'un maillage dense d'intermédiaires de production assurant la fourniture d'intrants et la commercialisation des récoltes.

Les politiques rurales ont également été marquées par le développement d'un cadre légal :

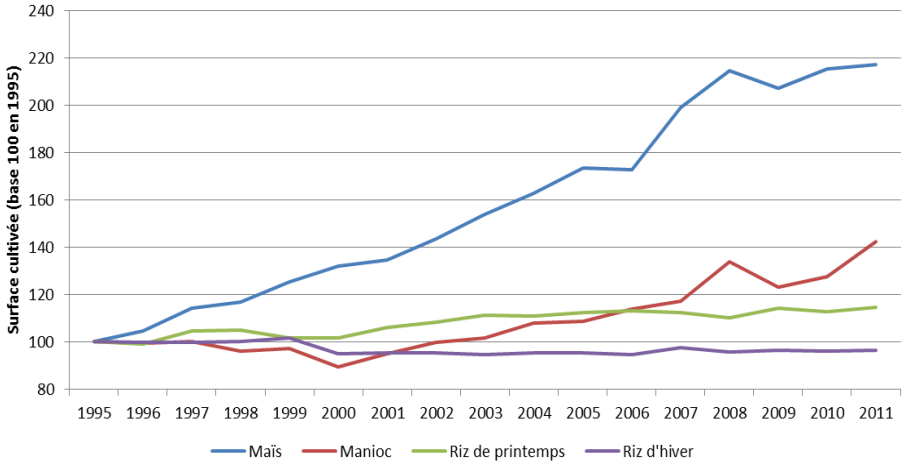
- pour la création d'appellations géographiques protégées (thé, café) ;
- pour le développement des cultures sous contrat (« contract farming ») (décret 80 – 2002) qui sont devenues un facteur clé de l'intensification de la production agricole au Vietnam comme dans les pays voisins (Castella, 2012). Le « contract farming » prend différentes formes selon la culture, les objectifs et les ressources de l'acheteur et l'expérience des agriculteurs (Castella, 2012). Il s'applique principalement aux cultures pérennes ou industrielles. Les producteurs de maïs sur pente les plus contraints financièrement peuvent toutefois bénéficier d'arrangements s'y apparentant pour l'acquisition des intrants nécessaires à la production. Ces arrangements prennent la forme de crédits de campagne assurés par les intermédiaires de la filière (collecteurs).

La décennie qui vient de s'écouler se caractérise également par un accroissement des opportunités de revenu non-agricole, ainsi que par une augmentation significative des couts de la main d'œuvre salariée. Dans un contexte de forte inflation (de 7 à 20 % par an entre 2008 à 2012), nous avons pu constater un doublement des prix de la main d'œuvre salariée entre 2009 (50 000 VND.jour-1) et 2012 (100 000 VND.jour-1)

Parallèlement, une nouvelle classe de paysans sans terre (souvent confisquées suite à des crédits non honorés) émerge progressivement. Celle-ci est employée par les exploitations les plus aisées, dans le cadre de migrations saisonnières localisées vers des zones de moindre densité de population.

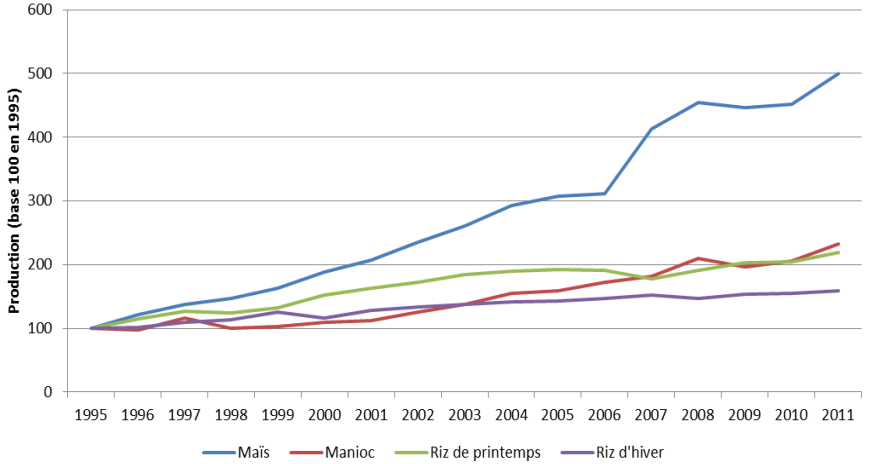
En lien avec les programmes de replantation à visée d'exploitation commerciale, la couverture forestière a augmenté durant la dernière décennie. Du fait de la saturation des zones irriguées, le rôle et l'importance des espaces de culture pluviale pour répondre à la demande du marché s'est par ailleurs accru. Par opposition aux surfaces rizicoles qui sont restées relativement stables, l'expansion des cultures pluviales s'est poursuivie au cours de la dernière décennie, plus particulièrement pour ce qui concerne la culture du maïs et du manioc, mas également et de façon limitée pour certaines cultures pérennes comme le thé ou le café (Figure I-4).

Figure I-4. Evolution relative des surfaces cultivées pour les principales cultures annuelles de la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011)



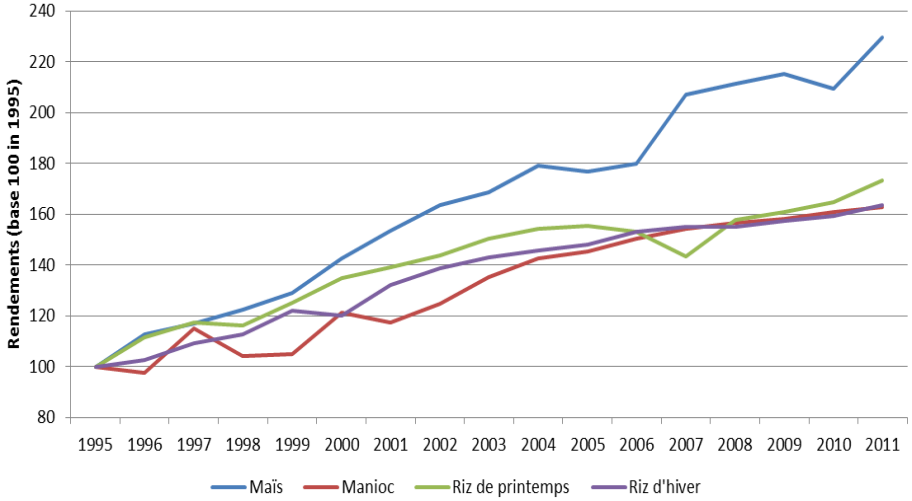
Source: General Statistics Office of Vietnam

Figure I-5. Evolution relative de la production pour les principales cultures annuelles cultivées dans la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011)



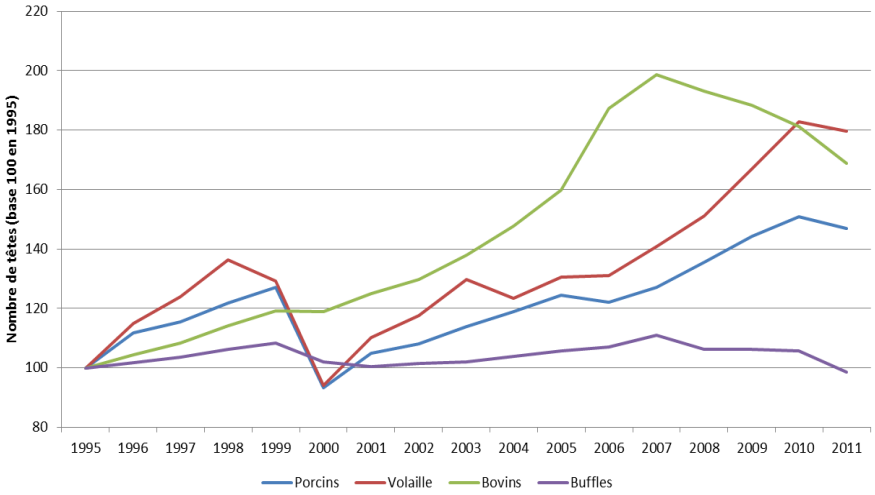
Source: General Statistics Office of Vietnam

Figure I-6. Evolution relative du rendement des principales cultures annuelles cultivées dans la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011)



Source: General Statistics Office of Vietnam

Figure I-7. Evolution relative (en nombre d'animaux) du cheptel élevé dans la région de moyenne et de haute altitude du Nord Vietnam (1995-2011)



Source: General Statistics Office of Vietnam

Cette dynamique d'expansion des cultures annuelles a notamment été favorisée par le fort développement de l'usage des herbicides sur pentes depuis 2004, qui a permis aux producteurs de réduire les contraintes de travail liées à la gestion des adventices. La production (Figure I-5) et la productivité des cultures pluviales ont également augmenté (Figure I-6), avec des gains de rendement de 160% à 230% par rapport à ceux relevés en 1995. Ces gains de productivité s'expliquent par les progrès variétaux, la généralisation de l'usage des engrais minéraux et la diffusion des herbicides (toutes cultures) et des insecticides (essentiellement pour les cultures pérennes et le riz irrigué).
Ils traduisent néanmoins un endettement et une dépendance accrue des producteurs vis à vis des intermédiaires agissant pour le compte des agro-industries. En se spécialisant dans un nombre limité de spéculations agricoles, les agriculteurs sont aussi devenus plus vulnérables aux variations de prix (Castella, 2012).
Enfin, les systèmes d'élevage aussi bien familiaux que semi-intensifs ont également pris plus d'importance au cours de la dernière décennie (Figure I-7).
Une rapide différenciation économique a élargi les différences entre les zones irriguées riches et les zones marginales de cultures pluviales. Dans le même temps, les inégalités se sont accrues entre les producteurs de cultures pluviales qui ont su saisir les opportunités d'investissement en dépit des niveaux importants de risque associés, et les autres, adoptants plus tardifs ou paysans sans terres (Castella, 2012).

2.3. Explorer le potentiel de l'agriculture de conservation pour intensifier durablement les systèmes maïs sur pente

Dans ce contexte, nous avons centré notre analyse sur les systèmes agricoles incorporant une production de maïs sur pentes, en raison de son poids économique et des risques d'impact environnemental (érosion, pollution) qui lui sont associés (Clemens et al., 2010; Valentin et al., 2008; Vezina et al., 2006) (Encart I-2). La plupart des acteurs du développement considèrent que l'agriculture de conservation est une innovation susceptible de maintenir sur le long terme la production à un niveau élevé, tout en réduisant les risques d'impact environnemental associé au travail continu du sol sur pentes (Vu Dinh et al., 2012; Wezel et al., 2002).
L'agriculture de conservation constitue une innovation de rupture par rapport aux systèmes conventionnels (Erenstein, 2003) tant au niveau de la mobilisation des moyens de production au sein de l'exploitation (travail) qu'au niveau des objectifs poursuivis (intensification durable adossée à l'intégration d'un objectif d'augmentation de la production de biomasse végétale par des plantes de service). Elle génère une contrainte de gestion de la biomasse produite (protection en intersaison, constitution du mulch pour le semis direct) et modifie les pratiques culturales (semis, gestion de l'enherbement, en particulier). En ce sens, l'agriculture de conservation constitue moins une innovation par retrait au sens de Goulet (2008) qu'une innovation par substitution (des composantes techniques additionnelles se substituant au labour).
L'identification des contextes et des options pour lesquels l'agriculture de conservation constitue une innovation envisageable par de petits producteurs est une question centrale de recherche pour le développement. Peu d'auteurs ont antérieurement abordé la question au Vietnam. Martin et al. (2004) ont montré pour des systèmes innovants visant une meilleure intégration agriculture-élevage que l'agriculture de conservation avait un potentiel d'adoption différencié selon les exploitations. Affholder et al. (2010) ont montré que l'augmentation des coûts de production et du travail associé à la conversion à l'agriculture de conservation pénalisait ses performances économiques sur un horizon d'une année. Ceci pose la question de l'horizon temporel à considérer pour que l'agriculture de conservation soit attractive pour de petits producteurs familiaux.

Encart I-2. Indices d'impact environnemental des systèmes de culture conventionnel à base de maïs sur pente.

Traces d'érosion dans des parcelles de maïs surmontant des cours d'eaux chargés en particules de sols

Hauswirth D., Son La, 06/2011

Traces d'érosion dans des sols de pentes labourés pour le semis du maïs.

Hauswirth D., Son La, 04-05/2011

3. Problématique de recherche

Dans ce contexte, notre objectif général se décline en trois questions de recherche spécifiques (Q) à partir desquelles sont élaborées 4 hypothèses à tester (H):

Q1. Dans une région tropicale de montagne présentant une forte hétérogénéité tant biophysique (type de sol, pente, altitude, microclimat…) que socioéconomique (accessibilité, accès au marché…) quels sont les systèmes agricoles (i.e. systèmes de cultures et systèmes de production) pour lesquels l'agriculture de conservation constitue une réponse *a priori* pertinente aux enjeux de durabilité sous-jacents à ces systèmes ?
H1a. Même dans un contexte agraire caractérisé par une forte hétérogénéité biophysique, la diversité des systèmes de culture pour une production déterminée s'explique principalement par les différences structurelles entre exploitations (contraintes dans la mobilisation des moyens de production).
H1b. La diversité des systèmes agricoles génère une diversité de problématiques de durabilité comme d'opportunités de changement

Q2 : La conversion à l'agriculture de conservation génère un risque de perte de rendement à court terme (Giller et al., 2009). Elle génère également une augmentation des coûts de production qui en pénalise la rentabilité sur un horizon d'une année (Affholder et al., 2010). Dans une petite région agraire où l'agriculture de conservation constitue une réponse *a priori* pertinente pour réduire l'impact environnemental de l'agriculture sur pente, quelle est la durée minimale de temps à considérer pour que ses performances agronomiques génèrent une attractivité économique équivalente à l'agriculture conventionnelle ?
H2 : Sur un horizon de deux années culturales, les performances agronomiques et économiques des systèmes de culture en agriculture de conservation sont équivalentes à celles obtenues en agriculture conventionnelle.

Q3 : Dans quelle mesure l'information issue de dispositifs de démonstration mis en place en milieu paysan sans répétition permet-elle de construire les bases d'une évaluation quantitative à court terme des performances et contraintes de systèmes de culture ? Il s'agit plus spécifiquement de déterminer les conditions dans lesquelles les données collectées au sein de matrices de démonstration-formation (Séguy, 1996 ; 2001) peuvent être mobilisées pour construire une évaluation multicritère des performances agronomiques et économiques de l'agriculture de conservation puis en évaluer *ex-ante* l'attractivité économique à différents horizons temporels par modélisation bio-économique.
H3a: Les performances des systèmes mis en évaluation sur des sites de démonstration-formation sont représentatives des performances obtenues par des agriculteurs soumis aux mêmes conditions. Elles sont donc mobilisables pour construire une évaluation *ex-ante* des systèmes de culture alternatifs
H3b: Il est possible de tirer des conclusions valides scientifiquement à partir de données collectées au sein de sites de démonstration-formation non initialement conçus à visée d'exploitation statistique

4. Démarche générale de la thèse

Ce travail de thèse est structuré selon 5 chapitres dont les liens fonctionnels sont illustrés dans la figure I-8.

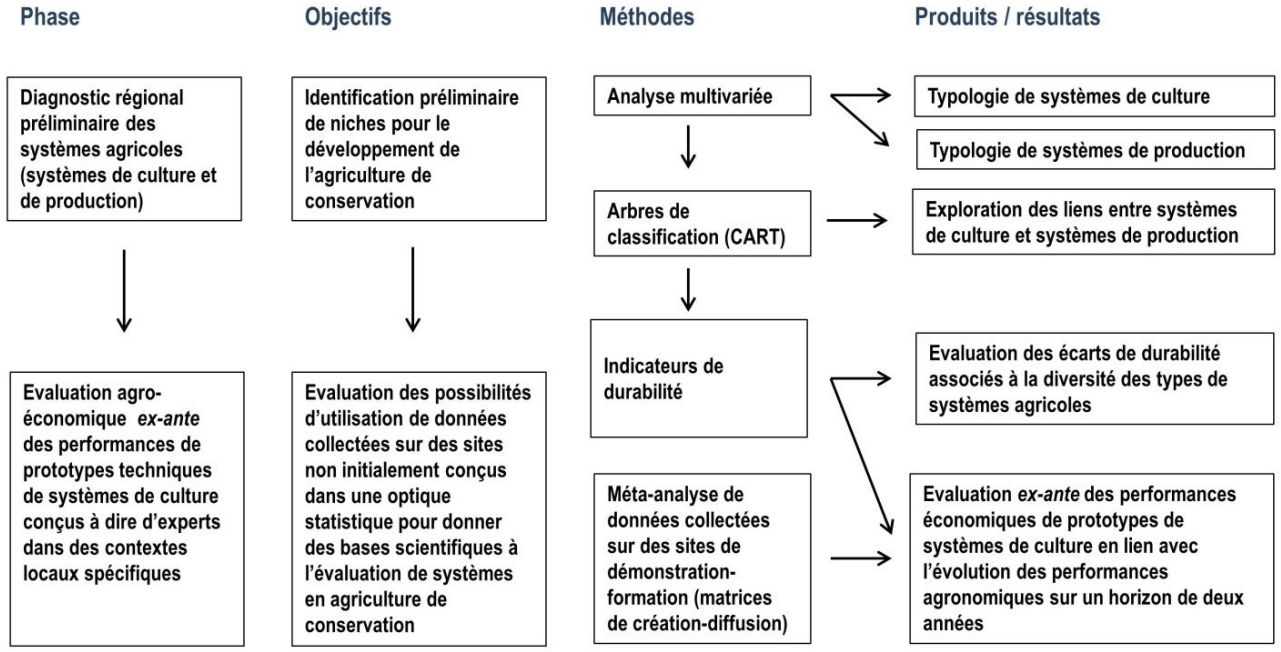
Le premier chapitre est une introduction générale présentant l'objectif du travail qui a été mené, le contexte de ce travail, les questions et hypothèses de recherche retenues et la démarche générale qui a été suivie.
Le second chapitre présente les concepts et méthodes retenues dans le traitement de la problématique de recherche.
Le troisième chapitre revisite les méthodes de catégorisation des systèmes de culture en cherchant à établir les liens existants entre systèmes de culture, systèmes de production, caractéristiques des territoires et performances de durabilité des systèmes. Ce chapitre est proposé en tant que publication soumise à *European Journal of Agronomy* le 15 Juillet 2013.
Le quatrième chapitre évalue dans quelle mesure les données issues de sites de démonstration et formation permettent de comparer les performances agronomiques et économiques de systèmes de culture en agriculture conventionnelle et en agriculture de conservation. Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article soumis pour publication à la revue *Journal of Experimental Agriculture* le 1er novembre 2013.
Le cinquième et dernier chapitre correspond à une discussion générale sur les résultats obtenus, clarifiant en particulier les biais de recherche et le domaine de validité des résultats. Les perspectives scientifiques et les implications pour le développement nées de ce travail y sont également abordées.

Figure I-8. Démarche générale de la thèse

Chapitre II. Démarche et méthodes

Nous présentons dans ce chapitre les principaux concepts et méthodes mobilisés pour répondre à nos questions de recherche, ainsi que les principales hypothèses émises dans la mise en œuvre de ces méthodes. Nous nous centrons ici sur la démarche globale (Figure I-8) et les aspects généraux des méthodes retenues dans le cadre de cette démarche (Figure II-1), leur détail étant donné dans les chapitres 3 et 4.

Figure II-1. Objectifs, méthodes, et produits associés aux différentes phases de la démarche



1. Une approche des systèmes agricoles quantitative et restreinte aux principaux caractères structurants des types de systèmes élaborés

1.1. Systèmes de culture et systèmes de production

Notre travail s'appuie sur le paradigme systémique, qui procède d'une représentation de la réalité agraire comme d'un ensemble de systèmes complexes emboîtés. Nous avons mobilisé les concepts de système de culture et de système de production, désignés dans la suite du texte sous le terme de « systèmes agricoles ».

Dans la littérature francophone, le concept de système de culture dont Papy (2008) rappelle la genèse historique donne lieu à des différences d'interprétation. La définition la plus courante est celle de Sébillotte (1974) pour lequel un système de culture constitue « une surface de terrain traitée de façon homogène, par les cultures pratiquées, leur ordre de succession et les itinéraires techniques (combinaison logique et ordonnée des techniques culturales) mis en œuvre ». Papy en propose une lecture explicitement recentrée sur l'acteur, le définissant comme « une portion de territoire traitée de façon homogène, par une logique d'action appliquée à la production végétale se déclinant par un plan d'action accompagné de règles de pilotages » (Papy, 2001 *in* Penot (2001). Jouve (2006) précise que la dimension opérationnelle de ce concept dépend de l'échelle spatiale à laquelle il est utilisé. Nous avons ici mobilisé le concept de système de culture à une échelle régionale (chapitre 3), dans l'acceptation anglo-saxonne des cropping systems comme « the crops and crop sequences and the management techniques used on a particular field over a period of year » (Nafziger, 2013). Cette définition moins fixée que celle utilisée par l'agronomie française (Papy, 2008) conduit à considérer les opérations techniques plutôt que les logiques sous-tendant les pratiques d'acteurs.

Le terme de système de production fait l'objet de différences d'interprétation selon la perspective de l'analyste (Brossier, 1987). Nous nous référons ici à la définition proposée par Jouve (1992) définissant les systèmes de production comme « un ensemble structuré de moyens de production combinés entre eux pour assurer une production végétale et/ou animale en vue de satisfaire les objectifs du chef d'exploitation ». L'analyse des agricultures africaines a historiquement conduit à différencier le système de production du système d'exploitation, ce dernier correspondant à l'ensemble des systèmes de production dépendant d'un décideur, assimilable à l'unité économique qui représente l'exploitation agricole. En Asie, il y a généralement identité entre les systèmes de production et les systèmes d'exploitation. Nous utiliserons donc le terme de système de production pour qualifier les exploitations agricoles, correspondant dans la littérature anglophone au « farm system ou household farm system » (Dixon et al., 2001).
Enfin, les « farming system » correspondent à un ensemble de systèmes d'exploitation aux caractéristiques similaires. Ils sont définis comme "a population of individual farm systems that have broadly similar resource bases, enterprise patterns, household livelihoods and constraints, and for which similar development strategies and interventions would be appropriate" (Dixon et al., 2001).
Nous nous sommes placés ici (i) dans une représentation de ces différents systèmes comme d'un ensemble cohérent d'éléments en interaction fonctionnelle transformant des intrants en extrants, (ii) avec un parti pris méthodologique d'analyse quantitative et restreinte de la complexité de ces différents systèmes et (iii) à une échelle d'analyse essentiellement régionale. De ce fait, nous n'avons traité que marginalement des logiques d'acteurs sous-tendant le fonctionnement des systèmes agricoles.

1.2. Typifier les systèmes pour réduire la dimensionnalité du diagnostic agraire

Un type est un modèle générique défini par les propriétés caractéristiques d'une série d'objets. Le terme de « typologie » renvoie simultanément (1) à la science permettant l'élaboration des types, construite pour permettre l'analyse d'une réalité complexe et ordonner des objets, qui, bien que différents, présentent des caractéristiques communes et (2) au système complexe de types qui résulte de cette procédure (Landais, 1998). Les typologies sont des outils nécessaires pour permettre une évaluation compréhensive de la réalité (Girard et al., 2008).
Elles permettent en particulier de (i) réduire le nombre de fermes à prendre en compte pour représenter une réalité régionale diversifiée et (ii) hiérarchiser les facteurs à prendre en compte dans l'analyse des déterminants des systèmes agricoles.
Cependant, l'objectif d'une typologie n'est pas seulement de capturer l'hétérogénéité et d'obtenir une meilleure compréhension de la situation mais aussi d'être opérationnelle pour modifier la réalité (Kostrowicki, 1977). Les typologies de systèmes agricoles offrent en effet un cadre de diagnostic (Landais, 1998) et d'ajustement des recommandations techniques aux types générés (Costard et al., 2009).
Nous mobilisons ici des typologies de systèmes de culture et de production (chapitre 3) dans une perspective (i) de réduction de la dimensionnalité du diagnostic agraire (e.g. nombre et hiérarchie des facteurs à prendre en compte dans l'analyse exploratoire de la diversité des systèmes agricoles), (ii) d'exploration des liens entre types de systèmes de culture et types de systèmes de production et (iii) d'évaluation des performances des systèmes agricoles, essentiellement au plan agro-économique et dans une moindre mesure au plan environnemental. Dans le chapitre 4, nous utilisons par ailleurs la notion de « types » pour analyser des facteurs (par exemple les systèmes de culture) qui n'ont pas exactement les mêmes modalités mais présentent des caractéristiques suffisamment proches pour définir des classes différenciées.

1.3. Une typologie de systèmes de production générée en suivant une approche positiviste

Deux approches peuvent être distinguées pour générer des types de systèmes de production (Girard et al., 2008; Maton et al., 2005) :

- L'approche positiviste vise à révéler la diversité inhérente aux données collectées sur un large échantillon d'exploitations. Les types sont créés sans *a priori* sur le fonctionnement des exploitations, avec des hypothèses réduites aux variables explicatives à inclure dans l'analyse. Les méthodes mobilisées sont quantitatives et reposent sur des outils d'analyse multi-variée Köbrich et al. (2003).
- L'approche constructiviste vise à révéler le fonctionnement des systèmes de production. (Landais, 1998; Perrot and Landais, 1993). Elle repose sur des hypothèses à dire d'expert et mobilise des approches d'abord qualitatives des systèmes de production, comme par exemple l'analyse des trajectoires d'exploitation (Girard et al., 2008).

Une analyse comparative de ces deux approches a été conduite par Landais (1998).

- L'approche positiviste capture la dimension structurelle des exploitations de façon indépendante de l'analyste (Kostrowicki 1977). Cependant, les types résultant d'une classification hiérarchique ne sont pas indépendants les uns des autres et varient également selon les données collectées.
- Les méthodes constructivistes capturent la gestion stratégique de l'exploitation, ce qui est bien adapté à des objectifs opérationnels, mais reste dépendant de l'expert qui réalise l'analyse (Landais, 1998).

Nous nous sommes placés ici dans le cadre de l'approche positiviste (chapitre 3), appliquée à un échantillon relativement consistant d'exploitations agricoles enquêtées en 2010 et 2011. Ce choix a été fait dans une optique d'identification et de quantification des facteurs discriminants les structures d'exploitation, en faisant l'hypothèse que les aspects fonctionnels des exploitations découlaient en premier lieu des facteurs structurels (opportunités et contraintes dans l'accès aux moyens de production) et dans une perspective de reproductibilité de l'analyse (par exemple en comparaison historique).

1.4. Un parti-pris de catégorisation des systèmes de culture à partir d'analyse multivariée.

Pour des raisons opérationnelles, les typologies de systèmes de culture sont le plus souvent réalisées en suivant une approche empirique à dire d'experts (Dore et al., 2008; Dore et al., 1997), également constructiviste.

Comme pour les systèmes de production, nous avons souhaité ici nous placer dans le cadre d'une catégorisation de systèmes de culture à partir d'une analyse multivariée (approche positiviste). Ce choix visait plus spécifiquement à explorer de façon quantifiée les liens entre systèmes de culture et systèmes de production, dont l'analyse constitue un problème récurrent du diagnostic agraire.

Plus fréquemment employée pour discriminer des pratiques d'élevage (Costard et al., 2009; Ribbens et al., 2008), ce type d'analyse n'a été que très rarement utilisé pour identifier des séquences cohérentes de pratiques agricoles, qu'il s'agisse de systèmes de culture (Le Bellec et al., 2011) ou d'irrigation (Maton et al., 2005).

D'autres approches de catégorisation des systèmes de culture sont plus fréquemment employées, comme les typologies territoriales / systèmes multi-agent (Tappan et al., 2004; Valbuena et al., 2008), les classifications fondées sur les processus et règles de décisions (Dounias et al., 2002; Merot et al., 2008) et l'analyse anthropologique des pratiques d'acteurs (de Sardan, 1995; Long and Ploeg, 2008). Ces approches renvoient toutefois à des dimensions particulières des systèmes de culture et à des échelles spatiales qui ne constituaient pas ici l'objet de notre recherche.

2. Une évaluation des performances des systèmes agricoles mobilisant des indicateurs opérationnels de durabilité

2.1. Une analyse adossée au concept de durabilité

La durabilité est considérée par certains auteurs comme un concept théorique nécessitant d'être rendu opérationnel (Rigby and Caceres, 2001). D'autres auteurs mettent l'accent sur le fait que ce qui est considéré comme durable diffère fortement selon la perspective de l'analyste (Lichtfouse et al., 2009; Rasul and Thapa, 2004). La plupart des auteurs convergent néanmoins pour considérer la durabilité comme un concept qui est (i) site-spécifique (ii) dynamique, (iii) nécessitant d'être analysé à des échelles spatiales, sociales[1] et temporelles clairement déterminées.

Il est par ailleurs généralement admis que les systèmes agricoles durables conjuguent trois composantes essentielles : (i) qualité environnementale (ii) performances agro-économiques élevées et (iii) acceptabilité sociale (Lichtfouse et al., 2009; Rasul and Thapa, 2004).

Un problème spécifique de la conception-évaluation de systèmes de culture durables est la hiérarchie des dimensions à considérer : pour qu'un système de culture soit acceptable socialement, sa dimension économique à court terme revêt plus d'importance que sa dimension environnementale à long terme.

A l'échelle des systèmes agraires, la durabilité peut par ailleurs se définir au travers de sept propriétés générales des systèmes de gestion des ressources naturelles. Ces propriétés sont : (a) la productivité, (b) la stabilité, (c) la fiabilité (d) la résilience, (e) l'adaptabilité; (f) l'équité; (g) et l'autonomie (Lopez-Ridaura et al., 2002).

Nous nous sommes appuyés sur cette définition dans l'évaluation des performances des systèmes de production et de culture, tout en la restreignant aux propriétés appropriées[2] aux échelles et aux objets considérés (chapitres 3 et 4).

L'évaluation de la durabilité d'un système agricole ne peut être conduite en tant que telle. Elle nécessite la mise en comparaison de situations, soit en considérant la dynamique d'évolution de la durabilité d'un système donné au cours du temps, soit en comparant les différents systèmes d'un territoire à un moment donné (Lopez-Ridaura et al., 2002).

C'est dans cette dernière optique que nous avons conduit notre évaluation, également menée en nous appuyant sur l'identification de l'analyse des facteurs et processus critiques pour la durabilité des systèmes. Pour autant, il peut être mentionné que l'évaluation de la durabilité conduit à différentes difficultés d'ordre méthodologique, en particulier l'intégration des conclusions faites à différentes échelles d'analyse (van Ittersum et al., 2008).

2.2. La construction d'un ensemble d'indicateurs opérationnels de durabilité centrée sur l'effet potentiel des pratiques agricoles

La construction d'indicateurs de durabilité, qui correspondent à des variables synthétiques pour décrire des systèmes complexes, est une étape essentielle de l'évaluation des systèmes agricoles (van der Werf and Petit, 2002). Certains auteurs, comme Castoldi and Bechini (2010), ont cherché à développer des index uniques de durabilité, mais l'approche la plus fréquente consiste à sélectionner un nombre limité d'indicateurs pour chaque critère de durabilité qui est considéré.

---

[1] L'échelle sociale d'analyse renvoie à la nature des acteurs pris en compte au sein d'un espace déterminé. Notre analyse se focalisait ici sur les seuls agriculteurs, excluant les autres acteurs pouvant avoir un impact sur la durabilité des agro-écosystèmes, qu'ils soient situés à l'intérieur (usines de transformation), ou à l'extérieur du territoire observé (compagnies agro-industrielles).

[2] L'attribut d'équité a par exemple été écarté de l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture à l'échelle du champ cultivé

Nous nous sommes placés dans cette dernière perspective (chapitre 3 et 4), en visant un jeu d'indicateurs qui soit simultanément minimal (principe de parcimonie), tout en étant cohérent et suffisant (Lebacq et al., 2013) au regard des aspects de durabilité identifiés comme critiques dans une phase de diagnostic préliminaire.
Les aspects critiques de la durabilité font d'abord référence aux critères pour lesquels sont constatés des niveaux très éloignés d'atteinte des objectifs assignés à des systèmes agricoles durables. Ils font également référence à la hiérarchie des priorités entre différents critères de durabilité pour un système agricole donné (par exemple, priorité de la rentabilité économique immédiate sur la rentabilité à moyen terme pour un type d'exploitation dont les revenus sont en dessous du seuil de pauvreté).
Cinq étapes doivent être distinguées dans l'élaboration et l'utilisation d'indicateurs: (1) La définition préliminaire des objectifs recherchés et des usagers de ces indicateurs (2) la construction des indicateurs et des modalités de leur mesure (3) la sélection de valeurs de référence, (4) l'analyse de leur sensibilité et (5) les modalités de leur validation (Bockstaller et al., 2008; Girardin et al., 1999). La mesure d'indicateurs peut mobiliser des approches aussi diverses que la synthèse bibliographique, des mesures directes, la modélisation, des enquêtes de terrain, etc. (Lopez-Ridaura et al., 2002). La validation des indicateurs retenus est un aspect méthodologique complexe. Parmi les différents volets de leur évaluation, Cloquell-Ballester et al. (2006) propose la réalisation de tests d'utilité auprès des usagers de ces indicateurs au regard des objectifs qui leur sont assignés.
Nous avions ici pour objectif de réaliser un premier diagnostic de la durabilité des systèmes agricoles à une échelle régionale (chapitre 3) débouchant sur une analyse des performances agro-économiques à court terme de systèmes de culture innovants à l'échelle du champ cultivé (chapitre 4). Les indicateurs mobilisés ont été construits sur la base de données à dire d'acteurs (chapitre 3) et de mesures au champ (chapitre 4). Ils s'adressent à des concepteurs de prototypes de systèmes de culture, définis ici comme des systèmes de culture alternatifs générés selon une démarche compréhensive intégrant un ensemble d'objectifs et de contraintes agronomiques, économiques et environnementales (Blazy et al., 2009b; Lançon et al., 2007; Vereijken, 1997).
Les valeurs de référence et la validité de ces indicateurs ont été déterminées sur une base essentiellement bibliographique. Une difficulté d'ordre méthodologique provenait de la nature des indicateurs à mobiliser pour la conduite d'une évaluation partielle d'impact environnemental de l'agriculture. L'impact environnemental ne peut pas toujours être mesuré de façon directe, en particulier à des échelles régionales d'analyse (Bockstaller et al., 2008). Pour des raisons opérationnelles, nous avons mobilisé des indicateurs de pression potentielle sur l'environnement basés sur les pratiques d'agriculteurs (van der Werf and Petit, 2002) plutôt que des indicateurs de l'effet direct que ces pratiques ont sur l'environnement (Girardin et al., 1999).

3. Une évaluation de l'attractivité économique de prototypes de systèmes de culture en agriculture de conservation basée sur une analyse en regroupement de données collectées au sein de sites de démonstration-formation

Nous avons construit notre analyse *ex-ante* de l'attractivité de l'agriculture de conservation en nous appuyant sur (i) une étude de cas (ii) à partir des performances comparées de systèmes de culture conventionnels et prototypés au sein d'un dispositif multi-local de démonstration formation mis en place par un projet de recherche-développement (iii) à l'échelle du champ cultivé et (iv) en considérant un horizon temporel de deux ans.

Nous nous plaçons donc ici dans la perspective de l'évaluation de prototypes générés à dire d'expert et par expérimentation (Blazy et al., 2009b; Lançon et al., 2007; Vereijken, 1997) plutôt que dans l'optique d'évaluation de prototypes générés par modélisation (Dogliotti et al., 2003, 2004) Nous développons dans cette section les principales hypothèses liées à ce parti-pris méthodologique.

3.1. Une perspective méta-analytique restreinte pour répondre à une question de recherche à partir de données collectées sur des sites de démonstration

La recherche ne génère pas toujours la même réponse à la même question avec la même approche (Lei et al., 2007). C'est d'autant plus vrai lorsque des données agronomiques expérimentales sont mobilisées, du fait de l'absence de possibilité de contrôle par l'expérimentateur de certains paramètres abiotiques et biotiques. Si les expérimentations réalisées en champs paysans sont fréquemment dupliquées dans l'espace, il est plus malaisé de les répliquer dans le temps, du fait même de leur nature, de leur durée et de leur coût.

D'un autre côté, une quantité importante d'informations est générée avec des coûts importants sur des sites de démonstration, fermes de référence ou réseaux paysans, mis en place par exemple dans le cadre de projets de développement rural. Ces données sont la plupart du temps faiblement valorisées, du fait de l'absence ou de la faiblesse des dispositifs statistiques associés à leur construction.

A partir de la combinaison de données expérimentales issues de différents contextes, la méta-analyse permet d'envisager de s'affranchir au moins partiellement de ces problématiques en mettant en évidence des tendances particulières dont chaque jeu de donnée constitue un variant. Des données de différentes origines (expérimentations, démonstrations) peuvent être incorporées dans ce type d'analyse, sous réserve des précautions prises dans l'interprétation qui en est faite (Gates, 2002).

Des méta-analyses portant sur un nombre conséquent d'études publiées ont été mobilisées récemment pour mettre en évidence le poids relatifs de facteurs biotiques et abiotiques sur les différences de productivité à long terme entre agriculture de conservation et agriculture conventionnelle, respectivement en climat tempéré (Ogle et al., 2012) et semi-aride (Nyamangara et al., 2013b; Rusinamhodzi et al., 2011).

Nous disposions ici de données permettant la construction d'indicateurs de productivité et de rentabilité collectées au sein de 3 sites de démonstration-formation non conçus à l'origine pour une interprétation statistique. L'aménagement de chaque site de démonstration peut être assimilé à un dispositif multifactoriel de démonstration non randomisé et non répété. Nous y faisons référence dans la suite du texte sous le terme de dispositif matriciel de création-formation-diffusion.

Nous avons réalisé une analyse en regroupement pouvant s'apparenter à une forme restreinte de méta-analyse pour analyser dans quelle mesure ce type de dispositif pouvait être mis à profit pour tester une hypothèse de recherche, ici celle d'une productivité et d'une rentabilité identique entre agriculture de conservation et agriculture conventionnelle sur un horizon de deux ans.

3.2. Les hypothèses relatives aux systèmes de culture évalués

Situés dans une région dans laquelle il n'existe pas, à ce jour, de dynamiques d'adoption et de diffusion de l'agriculture de conservation, notre analyse s'est basée sur l'évaluation *ex-ante* de prototypes de systèmes de culture au sens de Lançon et al. (2007), procédant de boucles enchaînant diagnostic, conception, évaluation et ajustement des systèmes à dire d'expert.

Les méthodes de conception des systèmes de cultures peuvent être classifiées en diverses catégories (Lançon et al., 2007; Le Gal et al., 2011). Elles incluent en particulier (i) les expérimentations systèmes testant quelques composants du système technique et leurs interactions (Rapidel et al., 2009); (ii) l'analyse à dire d'expert de pratiques d'agriculteurs et de leur perception (Blazy et al., 2009b), (iii) les modèles générant un grand nombre de rotations simulées qui sont explorés dans la perspective d'une grande variabilité de conditions biophysiques (Dogliotti et al., 2005), éventuellement combinées avec des modèles de décision (Bergez et al., 2010; Debaeke et al., 2009) (iv) les méthodes de prototypage (Vereijken, 1997) qui relèvent d'une approche compréhensive combinant diagnostic régional, identification des contraintes et objectifs pour établir un cahier des charges partagés, conception à dire d'expert et expérimentation en milieu paysan (Lançon et al., 2007).

Les prototypes de systèmes de culture mis en évaluation dans le cadre de notre analyse (Encart II-1) ont été générés à dire d'expert, en suivant l'approche DDATE (Diagnosis, Design, Assessment, Training and Extension) décrite par Boulakia et al. (2012) et Lienhard (2013). Cette approche se définit par la mise au point d'alternatives techniques en agriculture de conservation avec des plantes de service à fortes biomasses multifonctionnelles, combinant la conception « *de novo* » de systèmes de culture en rupture avec les systèmes conventionnels et la conception « pas-à-pas ». Conception « *de novo* » fait ici référence au fait que les prototypes de systèmes de culture sont générés sur la base d'une vision prospective large de l'agriculture, non limitée aux opportunités de marché existantes ou aux contraintes locales dans l'accès aux ressources et intrants. Conception « pas à pas » fait référence à l'évolution progressive des prototypes techniques en fonction de l'évolution de la perception des propriétés locales de ces prototypes selon l'expérience cumulée par les expérimentateurs (Coquil et al., 2011). Dans cette approche, les systèmes de culture sont conduits et ajustés simultanément au sein de la parcelle cultivée, en fonction des performances agronomiques et économiques obtenues ainsi que des difficultés rencontrées dans la conduite des systèmes.

Nous avons fait l'hypothèse que les systèmes inclus dans notre évaluation sont (i) techniquement maîtrisés ; (ii) qu'ils sont faisables et gérables par de petits producteurs sous certaines conditions ; (iii) qu'ils présentent un potentiel d'amélioration de la rentabilité économique à court terme pour les agriculteurs tout en (iv) étant plus durable au plan environnemental que les systèmes de culture actuellement pratiqués.

Nous avons également fait l'hypothèse que les agroécosystèmes dans lesquels ces prototypes ont été développés n'ont pas atteint un stade de dégradation tel qu'il n'est plus économiquement rentable d'investir dans l'agriculture de conservation pour tenter d'y remédier (Antle et al., 2006).

Plus spécifiquement, les systèmes de culture mis en évaluation n'ont pas été conçus pour permettre une restauration rapide de la fertilité des sols dans des conditions de dégradation si avancée[3] que la culture annuelle n'y est plus réalisée. Ces systèmes constituent donc de bons systèmes de conservation et de restauration de la fertilité des sols sous condition de milieux disposant d'un potentiel agronomique minimum.

Nous nous situons enfin dans un milieu présentant une forte hétérogénéité tant biophysique que sociotechnique (déterminant par exemple l'accès à l'innovation) et économique (accès au marché). Ceci implique que la conception-évaluation de systèmes de cultures se fasse sur des territoires présentant des conditions biophysiques et économiques relativement homogènes, ce qui est généralement le cas à l'échelle du village (Dartigues L, 1996).

[3] Dans de telles conditions, l'inclusion de soles culturales spécifiquement dédiées à la régénération du milieu constituerait un prélalable à la culture commerciale

Encart II-1. Exemple de prototype de système de culture. Maïs associé à du *Stylosanthes guianensis* (en haut, à gauche) en rotation bi-annuelle avec un manioc associé à du Stylosanthes guyanensis (en haut, à droite). Chaque année, la couverture est contrôlée mécaniquement (en bas à gauche, utilisation d'un rouleau à cornières de fabrication locale en traction animale) puis chimiquement. Une fois le mulch constitué, la plante commerciale et la plante de couverture associée y sont semés directement (en bas à droite), simultanément (en haut à droite) ou de façon décalée dans le temps (en haut à gauche, association au premier sarclage du maïs).

Hauswirth D., Moc Chau (Son La), 08/11

Hauswirth D., Moc Chau (Son La), 08/11

Hoang Xuan Thao, Moc Chau (Son La), 04/2012

Hoang Xuan Thao, Moc Chau (Son La), 05/2012

3.3. Les hypothèses relatives à l'impact de l'agriculture de conservation sur la productivité agricole en zone tropicale de montagne

L'attractivité économique à court terme de systèmes de culture en rupture par rapport aux systèmes conventionnels diffère en fonction des caractéristiques structurelles et fonctionnelles des exploitations agricoles auxquelles ils s'adressent (Bradshaw, 2006; Uri, 2000). Cette attractivité diffère également selon les dynamiques de performances de ces systèmes alternatifs comparées à celles des systèmes conventionnels, qui peuvent être considérées à différents horizons temporels. Dans cette perspective, il importe également de distinguer la phase de transition vers l'agriculture de conservation (Erenstein, 2003), où les systèmes de culture sont en cours d'ajustement et où les processus sous-jacents (par exemple l'accroissement du taux de matière organique) n'ont pas encore produit d'effet positif sur les performances agronomiques des systèmes, d'une phase de « consolidation », où les systèmes bénéficient de l'effet positif à long terme des processus sous-jacents engagés lors de la transition.

Nous avons considéré ci que l'attractivité économique de l'agriculture de conservation pour de petits producteurs tenait d'abord à ses performances agronomiques à court-terme et à l'échelle du champ cultivé.

Différents auteurs ont montré que l'agriculture de conservation présentait un impact variable sur les facteurs de productivité agricole à l'échelle du champ cultivé (Baudron et al., 2012; Scopel et al., 2013). L'impact de l'agriculture de conservation sur la productivité des cultures procède principalement de 5 facteurs dont l'expression diffère selon l'horizon de temps considéré (figure II-2) :

A court terme :

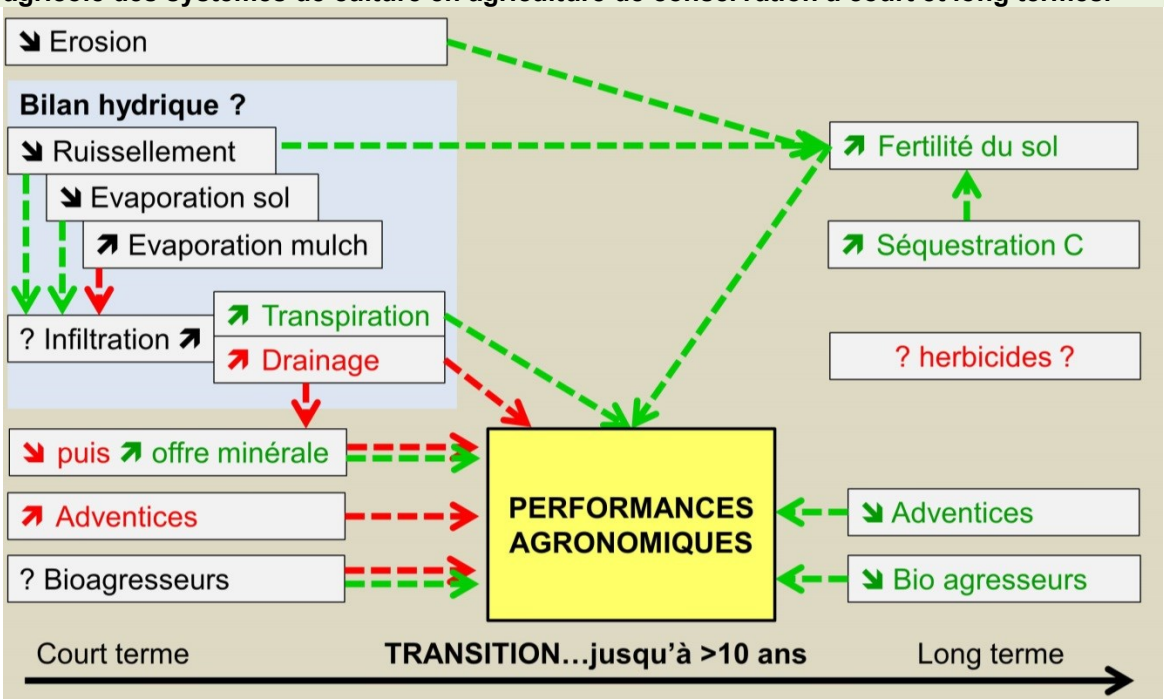
- Contrôle immédiat de l'érosion (Derpsch et al., 1986; Schuller et al., 2007; Shipitalo and Edwards, 1998)
- Effet variable sur le bilan hydrique. L'agriculture de conservation réduit le ruissellement (Shipitalo and Edwards, 1998) et l'évaporation de l'eau stockée dans le sol. Cependant, le mulch retient également une partie de l'eau de pluies qui est ensuite évaporé, ce qui ne peut être totalement négligé, notamment en présence de quantités de biomasse importantes. Selon l'intensité des pluies, leur répartition et l'alternance entre période sèches et périodes pluvieuses, l'augmentation d'eau infiltrée ne se traduit par ailleurs pas nécessairement par une augmentation de la transpiration des cultures mais peut générer une augmentation du drainage, et du coup de lixiviation de l'azote, en-dessous de la zone racinaire. Ceci se produit plus particulièrement lorsque les précipitations cumulées avant un épisode de sécheresse excèdent la capacité de rétention en eau du sol, de telle façon que le surplus d'eau infiltrée ne contribue pas toujours à une plus grande réserve hydrique pour la culture en période de sécheresse (Scopel et al., 2004).
- Effet négatif sur la disponibilité immédiate en éléments minéraux (Scopel et al., 2013). Dans un premier temps, l'agriculture de conservation génère une immobilisation temporaire d'azote liée à la minéralisation de la matière organique du mulch (Giller et al., 2009), qu'il peut être nécessaire de contrebalancer par un ajustement des fertilisations. Ce n'est qu'ensuite qu'elle permet d'augmenter l'offre minérale du sol. Le timing de l'amélioration de la disponibilité des nutriments est liée (i) aux restitutions minérales dont la cinétique est fonction de la quantité et de la nature des biomasses végétales constituant le mulch ainsi que de la vitesse de minéralisation en fonction des conditions climatiques (ii) à la quantité d'azote fixée par les légumineuses de couverture (iii) aux pertes par lixiviation, d'autant plus fortes que la pluviométrie est élevée (Scopel et al., 2004).
- Effet variable sur l'incidence des bio-agresseurs (Sturz et al., 1997)

- Tendance de l'agriculture de conservation à favoriser le développement à court terme des adventices (Baudron et al., 2012; Mashingaidze et al., 2012), dans des proportions qui dépendent de la quantité de mulch laissée au sol, de la flore adventice au moment de la constitution du mulch, et de la quantité de graines d'adventices incorporées au mulch.

A long terme :

- Amélioration de la fertilité chimique des sols cultivés (Kumar and Goh, 1999; Nyamangara et al., 2013a; Thierfelder et al., 2013), résultant d'une séquestration accrue du carbone (Chivenge et al., 2007; Corsi et al., 2012), et de l'impact cumulé au cours du temps de la réduction immédiate et durable de l'érosion et du ruissellement (Derpsch et al., 1986; Schuller et al., 2007; Shipitalo and Edwards, 1998; Wilson et al., 2008) avec des conséquences positives associées sur les propriétés physiques des sols ainsi que sur la diversité et l'abondance de la macrofaune ;
- Impact plutôt favorable à l'agriculture de conservation sur l'incidence des bio-agresseurs (Derpsch et al., 2010) ;
- Tendance de l'agriculture de conservation à un meilleur contrôle de la flore adventice, en lien avec l'effet suppressif des rotations culturales (Scopel et al., 2013). Modification simultanée de la flore adventice en lien avec les modes de contrôle des couvertures.
- Impact controversé sur l'impact environnemental des molécules herbicides utilisées dans le contrôle des couvertures

Figure II-2. Représentation schématique des processus agronomiques impactant la productivité agricole des systèmes de culture en agriculture de conservation à court et long termes.



Les couleurs verte et rouge désignent respectivement un impact positif et négatif sur le rendement

En zone tropicale humide, dans des zones de pentes caractérisées par (i) une forte érosion sous monoculture pluviale conventionnelle depuis plusieurs années (ii) associée à une dégradation continue de la fertilité chimique des sols, nous faisons l'hypothèse que l'agriculture de conservation peut avoir un effet bénéfique à court terme sur la productivité des cultures et que cet effet bénéfique est essentiellement lié à l'amélioration de la disponibilité des nutriments.

Cette hypothèse repose sur l'idée (i) que sous ce type de climat, la productivité des cultures est limitée par la disponibilité des nutriments minéraux plutôt que par les facteurs hydriques et que (ii) la protection contre l'érosion associée à la restitution de biomasse au sol peut améliorer sensiblement et rapidement l'offre en nutriments pour les plantes par rapport aux zones dégradées et soumises au ruissellement, sous condition de contrôle des bio-agresseurs et sous réserve de températures suffisemment élevées pour assurer une décomposition rapide de la matière organique.

.

3.4. Attractivité de l'agriculture de conservation à d'autres échelles que le champ cultivé

Dans le contexte particulier des zones de montagne du Vietnam, Affholder et al. (2010) ont montré que l'augmentation des coûts de production pénalisait les performances économiques des systèmes en agriculture de conservation lors de la première année après la conversion. Nous nous sommes placés ici dans la posture d'un agriculteur en situation d'opérer des décisions stratégiques en considérant un horizon de deux années.

Nous avons cherché à déterminer si l'amélioration des performances agronomiques à l'échelle du champ cultivé était suffisante pour générer une meilleure rentabilité économique en agriculture de conservation sur cet horizon et à cette échelle.

Ce faisant, notre analyse de l'attractivité économique de l'agriculture de conservation repose sur un paradigme de rationalité complète des producteurs (Dury et al., 2010).

Ce paradigme suppose que les décisions stratégiques des acteurs sont prises en connaissance de cause de la fonction de production qui lie les performances d'une activité donnée à un investissement particulier dans un contexte donné (Affholder, 2001).

Cette hypothèse est une approximation de la réalité dans laquelle les processus de décision opérationnelle, tactique et stratégique des producteurs (Janssen and van Ittersum, 2007) incluent anticipation, incertitude et risque (Dury et al., 2010).

Nous n'avons pas traité ici de la compatibilité des prototypes en agriculture de conservation avec la mobilisation des moyens de production à l'échelle du système de production. Bien qu'un modèle bioéconomique de ferme ait été construit à cet effet, cette phase n'a pu être finalisée à temps pour être incluse ici autrement que par la présentation de quelques résultats préliminaires en annexe 1. Elle constitue de ce fait le prolongement logique du travail présenté ici.

Il convient néanmoins de relever que l'agriculture de conservation constitue une innovation de rupture à l'échelle de l'exploitation agricole nécessitant des ajustements de l'allocation des facteurs de production (Erenstein, 2003; Giller et al., 2009). La décision d'adopter l'agriculture de conservation relève des prises de décision stratégiques avec des répercussions sur les décisions tactiques et opérationnelles de l'exploitation et c'est bien à cette même échelle que se joue en second lieu l'attractivité économique d'une innovation de rupture.

Son adoption peut par ailleurs nécessiter des modifications de règles de gestion du foncier opérées à l'échelle des communautés villageoises, plus particulièrement dans les zones où la vaine pâture est pratiquée à l'issue de la saison culturale comme c'est le cas au Vietnam (Castella et al., 2012; Lestrelin et al., 2012).

L'approximation réalisée dans notre analyse était suffisante pour tirer une première conclusion quant à l'attractivité économique de l'agriculture de conservation à l'échelle du champ cultivé, dans le contexte biophysique et agro-économique spécifique de notre étude de cas. Les conclusions qui ont résultent n'ont pas vocation à être généralisées au-delà de ce cas d'étude.

Chapitre III. Categorizing and describing cropping systems to identify sustainability gaps: a multivariate classification approach applied to maize-based systems in northern Vietnam

Categorizing and describing cropping systems to identify sustainability gaps: a multivariate classification approach applied to maize-based systems in northern Vietnam

Hauswirth D.[a,] Jourdain D.[b], Affholder F.[c], Wery J.[d], Lopez-Ridaura S.[e], Tittonell P.[c,f,]

[a] CIRAD, UPR SIA, Avenue Agropolis, 34 398 Montpellier cedex 5, France
[b] CIRAD, UMR G-EAU, Avenue Agropolis, 34 398 Montpellier cedex 5, France
[c] CIRAD, UPR SCA, Avenue Agropolis, 34 398 Montpellier cedex 5, France
[d] SUPAGRO, UMR SYSTEM #1230, place Viala 34060 Montpellier Cedex 2, France
[e] INRA UMR 0951 Innovation F-34000 Montpellier, France
[f] Wageningen University and Research Center P.O Box 563 67000 AN Wageningen, The Netherlands

Corresponding author
damienhh@gmail.com

Keywords
Cropping system typology, crop management practices, multivariate analysis, CART

Highlights
►We validated a method to categorize cropping systems, unravel drivers of their diversity then investigate their performances
► We identified 7 types of maize cropping systems with contrasted sustainability gaps
► Territory-related factors were of prevailing importance over plot biophysical conditions and farm/farmer characteristics to drive diversity of cropping system
► Economic profitability and agronomic productivity were converging goals but tradeoffs were identified between profitability and mining of soil fertility.

Abstract
Cropping system typologies are essential to tailor the redesign process of agricultural systems to the diversity of farming conditions in a region. Our goal was to design a methodological framework suited to categorize and unravel the drivers of the diversity of cropping system as a basis for investigation of their performances and sustainability gaps. This framework consisted in the following three steps: i. Design of a specific typology of cropping systems based on combination of farmers' practices ii. Exploration of interactions between cropping system types and territory-, farm/farmer- and field-related factors of variability iii. Sustainability analysis at cropping system scale.
We tested our framework in the northern mountains of Vietnam within a context of extreme diversity of agricultural systems at field, farm and territory scales. We applied to 625 maize fields and 411 maize producing farms our approach combining multivariate classification methods, including principal component analysis, multiple correspondence analysis, hierarchical clustering and classification and regression trees. We identified 5 farm types and 7 maize cropping systems types, strongly contrasted in terms of management practices, performances and sustainability issues. In all farm types higher economic profitability coincided with higher agronomic productivity. However, tradeoffs were detected between profitability and mining of soil fertility. The local diversity in maize cropping systems resulted from multi-scale interactions between territory-related factors, farm/farmer characteristics and field biophysical conditions. Within the context of our study, territory-related factors were of prevailing importance over plot biophysical conditions and farm/farmer related characteristics to drive diversity of cropping systems. This case study validated our methodological framework, of which we propose further use for prototyping innovation with regards to specific sustainability gaps at cropping system level, and more generally to constitute a ground on which to build any intervention or study about agricultural systems (e.g. regional agrarian diagnosis, yield gap or sustainability analysis, modeling, site sampling, field trials) especially under contexts of high knowledge gaps and high diversity of agricultural systems.

1. Introduction

Developing sustainable agriculture is a key priority, if not the Graal quest, for those concerned by rural development. What makes this so challenging is the high diversity of both the biophysical and socio-economic environments of farming, giving origin to an equally high diversity of agricultural systems, sustainability gaps, as well as rooms to overcome those gaps at various scales. Diversity of farming practices is sometimes considered an asset for the development of sustainable agriculture; most of the time, its importance remains largely unrecognized (Girard, 2006). Re-designing of cropping systems therefore should be tailored to the specific issues at stake in each agricultural system, necessarily grouped into categories, requiring solid framework to build typologies (Blazy et al., 2009b; Kostrowicki, 1977).

At cropping system level which refers to the crop, crop sequence and management strategy over a period of years, such typology is based on a diagnosis of farmers' practices and results in an analysis of cropping system performances. Although there are no permanent relationships between agricultural practices and complex indicators such as yields (Dore et al., 1997), many studies have demonstrated that crop management practices play a critical role in cropping and farming system performances (Blazy et al., 2009b; Kumar and Goh, 1999; Pacini et al., 2003) as well as sustainability at a local and global level (Tilman et al., 2002). Yield gap analysis with modeling tools (Affholder et al., 2013; Casanova et al., 1999; Fermont et al., 2009; Neumann et al., 2010; Singh et al., 2009; Tittonell et al., 2008b) and regional agronomic diagnosis (Dore et al., 2008; Dore et al., 1997) have been proposed among other methods to identify sustainability gaps in cropping systems and identify lee ways for their improvement.

In a given region, an essential preliminary stage is to identify the key combinations of management practices, by which differences between cropping systems can be apprehended as determining differences in sustainability performances. Only few studies however specifically deal with farmers' practices and management strategies, and even fewer investigate the correlations between practices (Le Bellec et al., 2011). Despite the existence of numerous indicator-based tools to assess performances of cropping systems once sustainability criteria have been identified (Bockstaller et al., 2009; Bockstaller et al., 2008), there is no global framework to discriminate between cropping systems and investigate their rationale, especially under contexts of high biophysical variability, large-scale regions and weak knowledge on farmers' practices and logics. For operational purposes, differentiation of cropping systems is frequently addressed through expert knowledge and empirical surveys (Dore et al., 2008; Dore et al., 1997) rather than through any other methods (Maton et al., 2005).

Cropping systems are the result of complex interactions between farmers' objectives, knowledge and rationale, their level of resource endowment, the biophysical environment and the socioeconomic context that sustain production. The relative contribution of those factors in determining diversity of cropping system was poorly investigated even when those factors were included in typologies. Understanding drivers of cropping systems differences and tradeoffs among management practices requires methods suited to non-linearities, thresholds, and the mixed handling of continuous and discrete variables, such as mixed classification methods.

Multivariate analysis has most often been used either to discriminate between land types (Sakané et al., 2011), farm types (Blazy et al., 2009b; Jourdain et al., 2011; Köbrich et al., 2003; Rapey et al., 2001; Tittonell et al., 2010) and/or to study the relation between crop yields, soil fertility and/or management practices (Delmotte et al., 2011; Jiang and Thelen, 2004; Roel et al., 2007; Sena et al., 2002; Sharma et al., 2005; Tittonell et al., 2008a; Tittonell et al., 2008b). In these cases, management practices were neither considered as the dependent variable nor grouped into management strategies but rather analyzed as a succession of independent technical operations, without specific interrelationships among each other. In agricultural sciences, multivariate methods have also been used to discriminate between livestock management practices (Costard et al., 2009; Girard et al., 2008; Ribbens et al., 2008), or irrigation strategies (Maton et al., 2005) but were rarely applied to investigation of crop management practices (Le Bellec et al., 2011).

With regards to these questions, our goal was to design and test a methodological framework to categorize and unravel the drivers of cropping system as a basis for investigation of sustainability gaps. We tested our framework in Northern Vietnam where on one hand the extreme heterogeneity of the landscape and the blooming economy were expected to result in a particularly challenging diversity of farming and cropping systems, and on the other hand the relatively recent expansion of intensive maize cropping systems raises sustainability concerns among most development stakeholders.

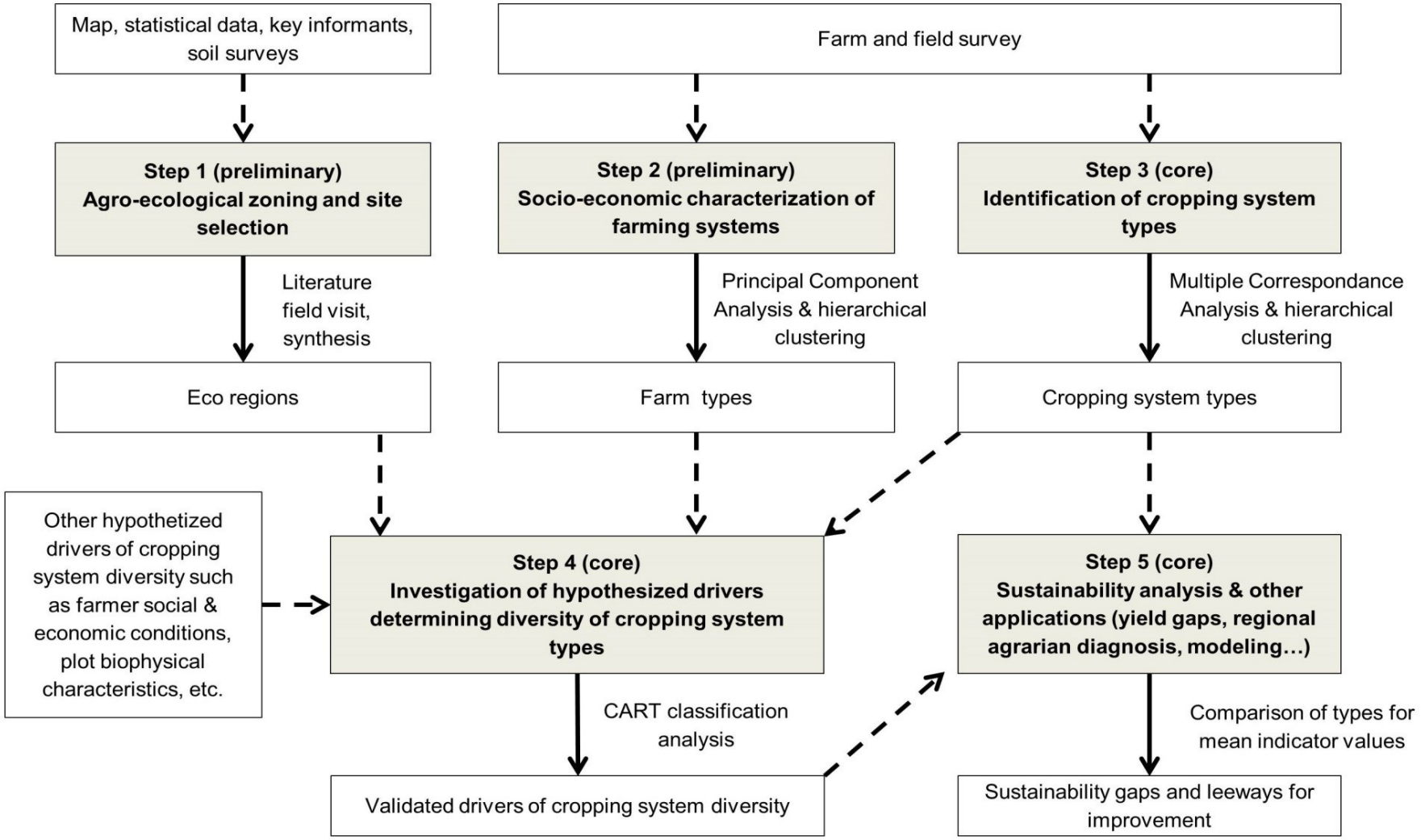
2. Material and methods

2.1. Methodological framework

We assume that the diversity of cropping systems (here based on maize) is driven by multi-scale interactions between territory-specific environmental and socioeconomic factors, farm resource endowment, farmer socio-economic conditions and field biophysical characteristics. We also assume that the performances of cropping systems are correlated with their diversity, thus making relevant to analyze the in-depth dependence of these performances to the environment once the main drivers of cropping system diversity have been unraveled.

To test our assumption, we applied a 5-steps approach combining diverse classification methods to a range of maize based cropping systems, maize producing farms and territories accounting for biophysical and socio economic diversity in the area (Figure III-1).

Figure III-1. Methodological framework to identify cropping systems, investigate the drivers of their diversity and assess their performances. Grey boxes correspond to steps. White boxes refer to inputs for a given step when associated to dashed arrows and to output from a given step when associated to plain arrows.



Once the ecoregions were identified and sites were selected (preliminary step 1), we implemented a coupled farm and field survey to collect data which were used to discriminate between farm types and to derive a set of indicators to i/ categorize cropping system, ii/ investigate the possible determinants of their diversity at field, farm and territory scale and iii/ assess their performances. Farm types were identified by Principal Component Analysis (PCA) complemented by Hierarchical Cluster Analysis (HCA) with the aim to further explore relationships between farm and cropping system types (preliminary step 2).
We identified types and subtypes of maize based cropping systems by Multiple Correspondence Analysis (MCA) complemented by HCA applied to variables reflecting key management practices (core step 3).
Following Kostrowicki (1977), the hypothesized drivers of diversity of maize cropping systems were not considered for categorization but tested for their correlations with cropping system types through a subsequent classification tree analysis (CART) (core step 4). To do this, we used 3 sub-sets of indicators, respectively related to territory-level characteristics, farm/farmer socioeconomic conditions and plot-level biophysical characteristics. Each subset of indicator was firstly tested independently for its capacity to explain cropping systems diversity then subsets were combined to inquire the relative importance of the different drivers of cropping systems diversity.
We finally implemented an analysis of cropping system performances (core step 5) to illustrate how the proposed method may practically result in identification of sustainability gaps.

2.2. The study area

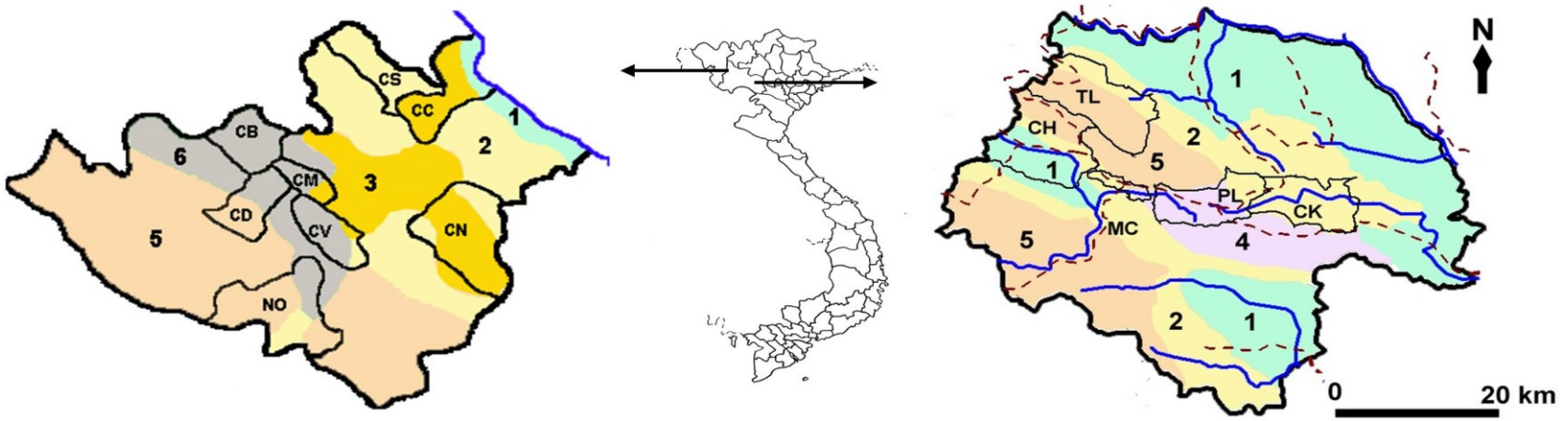
Our study covered 2 districts of Son La Province selected as representative of mountainous areas of Northwest Vietnam: Moc Chau district (20°07’ N to 21° 07’ N; 104°26’ E to 105°05’ E) and Mai Son district (21° 13' N to 21° 25' N, 103° 48' E to 104° 2' E) totalizing 3,494 km². Data at district level (Table III-1) show few differences in terms of biophysical, social and economic conditions.
However, this hides a high diversity of possible drivers of diversity of agricultural systems at village level including biophysical environments, population density, accessibility or ethnicity (Figure III-2).
In the mountains of Vietnam, ethnicity has been shown to play a role, albeit declining, in farm household differentiation, as a result of a differential access to information and resources from ethnies settled in the areas at different periods of History (Hoang et al., 2006). It thus had to be considered in the analysis, as a possible driver of diversity of cropping systems and their performances.
Elevation across the two districts ranges from 150 m above sea level (asl) along Da river to 1 889 m asl. Landscape includes valleys of extremely varying wideness, which determines the extent to which irrigable lowland is available along the valley axis. It also includes areas of flat land (medium elevation plain in Mai Son, high elevation plateau in Moc Chau). Both valleys and flat areas are surrounded by hills and mountains with steep slopes. Soils are neutral to strongly acidic and classified as leached ferralic acrisols, humic acrisols and rhodic ferralsols.
Average yearly rainfall reaches 1 600 mm and its distribution is unimodal, with a hot and rainy season from April to October and a cold and dry season from November to March. Below 700 m asl, the climate allows a sequence of two maize crops per year on a same piece of land and only one crop per year at higher elevation where crop cycle duration is increased due to cooler climate.
The average population density in 2008 exceeded 70 hab.km-2 in both districts, with large variations across villages, depending on topography and accessibility (Alther et al., 2002).

Table III-1. Land use and population related indicators for the two districts

District	Total area (x 1000 ha)	Of which						Livestock	Average pop. density in 2008 (hab.km^{-2})	Dominant ethnicity (% within a district)	Mean farm size (ha) (survey)	Land Labor Ratio (ha.equivalent full time familial active^{-1}) (survey)
		Agricultural production land	Of which		Of which (2007)		Unused & unusable land (hills & mountains)					
			Forestland	Cropland	Annual crops (%)	Perennial & industrial crops (%)						
Moc Chau	205	160	121	39	Maize (62.2) Cassava (5.3) Rice 1 / 2 crops (1.3/1.9) Canna (2.6)	Tea (7.3) Fruit trees (8.8)	37	Intensive dairy and pig production Buffalo, cattle, poultry horses, goats	72	Thai (33) Kinh (29) Hmong (14) Muong (16)	2,0	0,7
Mai Son	143	91	55	36	Maize (55.1) Cassava (6.1) Soybean (5.8) Rice 1 / 2 crops (0.8/1.8)	Coffee (3.8) Sugar can (9.0) Fruit trees (6.9)	28	Intensive and familial pig production Buffalo, cattle, poultry horses, goats	91	Thai (56) Kinh (27) Hmong (11)	2,1	0,7

Figure III-2. Agroecological zones of Mai Son (left) and Moc Chau districts (right), location & main characteristics of surveyed communes / villages.

Fig. 2. Agroecological zones of Mai Son (left) and Moc Chau districts (right), location and characteristics of surveyed communes / villages



Commune surveyed: Cò Nòi (CN) Chiềng Ban (CB) Chiềng Dong (CD) Chiềng Sung (CS) Chiềng Chăn (CC) Chiềng Mai (CM) Chiềng Ve (CV) Nà Ớt (NO) Tan Lap (TL), Chieng Hac (CH), Moc Chau (MC), Phieng Luong (PL), Chieng Khoa (CK)

Zone 1: Low-elevation (0-600 m asl), 2 crops per year, low population density, remaining forestland
Zone 2: Medium elevation (600-1000 m asl), medium to high population density, only one possible maize crop per year on steep slopes
Zone 3: Medium elevation plains (500-700m asl) densely populated, specialized intensive agriculture (sugar can)
Zone 4: High elevation (900-1100 m asl), densely populated hilly plateau, specialized intensive agriculture (tea, dairy production)
Zone 5: High-elevation (>1000 m asl), low population density, manual maize monocropping on steep slopes
Zone 6: High elevation (800-1200 m asl) hills and mountains, low population density, maize and coffee monocrops on steep slopes;

Commune (pop density hab/km²)	Village	Zone	Mean farm size (ha)	Dominant crops (nb. crops / year)	Dominant ethnic group	Accessibility
Cò Nòi (~90)	Lanh	3	2.1	Maize (1&2), sugar can, rice (1)	Thai	++
	Bo Hac	3	2.1	Sugar can, rice (2)	Thai	++
	Me Lech	3	2.1	Fruit tree, maize (1)	Kinh	++
Chiềng Ban(>100)	Doi 3	6	0.6	Coffee	Kinh	+
	Ang	6	0.8	Coffee, rice (2)	Thai	+
Chiềng Dong (~60)	Nghiu	6	0.7	Maize (1), coffee, rice (2)	Thai	+/-
Chiềng Sung (~70)	Cao Son	2	3.1	Maize (1&2),	Kinh	+/-
	Ca Nam	2	2.8	Maize (1), rice (2)	Hmong	+/-
Chiềng Chăn (93)	Xai Luong	2	2.1	Maize (1), rice (2)	Thai	+/-
	Ta Chan	1	2.0	Maize (1)	Thai	+/-
Chiềng Mai (~60)	Puon	6	1.4	Maize (1), sugar can, rice (2)	Thai	+/-
	Na Doc	6	1.4	Maize(1), sugar can, rice (2)	Thai	+/-
Chiềng Ve (~80)	Me Tren	6	1.3	Maize (1), coffee, rice (2)	Thai	+/-
Nà Ớt (24)	Ha Set	5	1.5	Maize (1), cassava	Thai	-
	Tram Co	5	3.2	Maize(1), coffee, upland rice	Thai-Xinh Mun	-

Commune (pop density hab/km²)	Village	Zone	Mean farm size (ha)	Dominant crops (n° crops / year)	Dominant ethnic group	Accessibility
Chieng Hac (63)	Ta So	5	1.6	Maize (1)	Hmong	-
	Ta Niet	1	1.4	Maize (1), vegetable	Kinh	++
	Pa Phang	1	1.6	Maize (1 & 2), rice (2)	Thai	+/-
Chieng Khoa (67)	Tin Toc	1	1.4	Maize (1), rice (2)	Thai (Muong)	+
Phieng Luong (77)	Suoi Khem	2	1.1	Maize (1), tea	Dao	++
	Pieng Sang	2	1.7	Maize (1), tea	Dao	+/-
Tan Lap (94)	Ban Hoa 1	2	1.1	Tea, maize, rice (1)	Native Thai	++
	Ban Hoa 2	2	1.1	Tea, maize (1)	Resettled	++
	Nam Tom	2	1.1	Tea, maize (1)	Thais	++
Moc Chau (250)	Co Do	4	0.5	Tea	Kinh	++
	Tien Tien	4	0.2			++

The land use systems have evolved from subsistence oriented to mostly market-oriented systems over the past two decades. They are highly diverse, as the result of diverse landscape characteristics (such as steepness of slopes or water availability in the valley determining the feasibility of mechanization and irrigated crops) and planned agricultural policies which has driven specialization of few production areas (tea, plums, forages, dairy production in Moc Chau district; sugar cane, arabica coffee and cassava in Mai Son district).
One sixth of the total area of both districts was devoted to maize (*Zea mays* L.) as a foremost monocropping production on slopes up to 40°. Secondary annual crops included cassava (*Manihot esculenta* C.) in both districts and canna (*Canna edulis*) in Moc Chau.

2.3. Village selection

We built a zoning of each district from available statistics, maps, geographic and biophysical data, field visits across the district and interviews with key informants.
Four main agro-ecological zones were identified in Moc Chau and five in Mai Son according to elevation and slope (as determining the feasibility of mechanization and cultivation of 2 maize crops per year instead of one), and to population density and land use. From this zoning, we selected 11 villages at Moc Chau and 15 villages at Mai Son to encompass diversity in agroecological conditions, dominant crops and accessibility as determined by researchers on a 4 level qualitative scale representing the speed and reliability of transportation for people and goods (Alther et al., 2002) to the center of the village. Villages were selected along a spectrum of farming activities from specialization in major crops at one end (tea in Moc Chau, coffee in Mai Son, maize in both) to diversification at the other end (Figure III-2).

2.4. Survey characteristics

We randomly interviewed 20 farmers per village to represent the diversity of farm, farmer, and farming situations, totalizing after discarding incomplete interviews 211 farmers at Moc Chau (of which 181 were maize producers) and 315 farmers at Mai Son (of which 230 were maize producers) accounting respectively for 11 and 31% of the households in the selected villages at Moc Chau and Mai Son. The interviews were conducted during the spring – summer seasons of 2011 and 2012 (May-July), following a quantitative questionnaire designed to capture biophysical, socio-economic, and managerial aspects of each farm, including family structure, land tenure, labor mobilization, access to credit, farmers' strategy to manage productive resources, input and output both at farm and plot scale. In each interviewed farm, all cropping systems were inquired on a field-by-field basis, including cultivation practices, crop performances, and management strategies (such as cropping patterns, intensity of input use, labor force mobilization). Field biophysical characteristics such as slope, landscape position, erosion, rock/stone cover, main constraint to production, soil color and fertility were collected from farmers assessment / declaration. Farmers' assessment of field biophysical characteristics were reported to generally be in agreement with measured indicators of soil properties in this region (Clemens et al., 2010).
Data corresponding to management practices and cropping system performances were collected by reference to the previous farming year but we also investigated cropping pattern over past five years for each field. All costs and incomes from agricultural production and on/off/non-farm activities were inquired for economic calculations converted to US$ (at a rate of 1 US$ = 20 000 VND).

2.5. Multivariate analysis

PCA, MCA and HCA were computed using XLSTAT 2011.4 and SPSS 17. CART was computed using CART 6.6.0.091 software.

2.5.1. Typology of farming systems

Farm typology was built following the ‘‘positivist approach” where types are created without prior expert-knowledge based assumption (Landais, 1998; Maton et al., 2005; Perrot and Landais, 1993). We conducted PCA following Köbrich et al. (2003) to identify independent socio-economic indicators to use as proxies for the household classification (Tittonell et al., 2010). We used a set of farm-scale characterization variables reflecting: i) farm resource endowment (farm asset value, surface farmed, livestock, labor force) ii) access and constraints to means of production (land/labor ratio, access to mechanization, employment of external laborers, off-farm, yearly farming investment), iii) livelihood (diversity of income sources) and iv) long-term positioning (non-farm employment, agricultural and economic specialization vs. diversification). Data were previously log or squared root transformed, then standardized for comparable range (Table III-A).

Transformed variables that did not present sufficient normality profile (skewness and kurtosis associated to normality probability lower than 90% at p=0.05) were discarded as active variable, but kept as supplementary ones for further interpretation of clusters (Table III-A).

Table III-A. List of variables used to categorize farms on a structural basis by principal component analysis complemented by hierarchical cluster analysis

Name of variable	Transformation	Description
Land Labor ratio	Root square	Total farmed land to equivalent full-time farm familial active (m².active-1)
Non and off farm	Root square	Contribution of non and off-farm to household income (%)
Yearly farming investment	Log	Total amount of money yearly invested for farming (US$)
Total area farmed	Log	Total surface of farmed land (m²)
Off-farm	Log	Income from selling familial labor-force (US$)
Livelihood	-	Number of livelihood sources
Mechanization	Root square	Estimated asset value of equipment and animals for mechanized and motorized traction (US$)
Farm wealth indicator	Root square	Present asset value of buildings, equipment and animal stock (US$)
Perennial crops	Log	Contribution of perennial crops to farmed land (%)
**Farmer age	-	Age of household’s head
**Nb. mouth to feed	Root square	Number of mouths to feed
**Nb. adults	-	Total number of household’s family members older than 16 years old
**Non-farm	Log	Contribution of non-farm to household income (%)
**Total labor cost	Log	Total amount paid for hiring daily and seasonal waged laborers (US$)
**Nb. pigs and goats	Root square	Total number of pigs or goats
**Nb. animals for traction	Log	Total number of cattle, buffalo and horses

** refers to variables that were selected as supplementary ones.

PCA was conducted for maize producers at each site independently then on the combined set of maize producing farms to check consistency of the drivers of farm typology across sites. Out of the 411 maize producing households, 52 outliers for the active variables corresponding to highly specific farm situations were identified and integrated to the PCA analysis as supplementary observations then further compared to clusters obtained by HCA on the active observations. Scores of the 7 principal components that together explained more than 95% of the variance (Tittonell et al., 2005) were included in a HCA, limiting the number of groups to five after i) examination of the group homogeneity / dissimilarities and ii) interpretation of the resulting clusters at different truncation levels. Farm types were assigned to cluster considering the splitting node of classification tree and clusters were interpreted in relation to the active and supplementary variables by comparing average value and dispersion between and within groups. To do so, Kruskall-Wallis non-parametric tests, Dunn method with Bonferroni corrections were implemented at p=0.05. As reported in Hauswirth et al. (2012), we finally used a complementary set of indicators reflecting economic efficiency (return to land, labor and capital), diversity (number of cropping and animal systems, number of non-farm activities), vulnerability (poverty ratio, household income to legal minimum wage) and dependency (asset value of external inputs, number of working days carried out by external laborers, contribution of farming to household income) to compare sustainability performances across farm types.
Economic terms such as income were calculated considering all intermediate consumptions for agricultural production as externally purchased and all agricultural production self-consumed as sold at mean market price at harvest.

2.5.2. Typology of maize cropping systems

We extracted from data collected at field scale, 395 maize plots cultivated by 181 maize producers at Moc Chau and 275 maize plots cultivated by 230 maize producers at Mai Son. We considered a set of 11 variables reflecting maize management practices comprising binary partitioned ones (burning, herbicide use before or along crop growth, storage before selling), variables grouped into nominal classes (maize cultivar, type of land clearance, land preparation, weed control, sale form) and ordinal variables evenly distributed which were derived from continuous ones (intensity of nutrient uses). We tested several combinations of variables and retained 6 main variables out of 11 after examining loading scores of the resulting MCA and independence of variable contributions to the factorial axis. We also selected variables to represent the whole management decision sequence. The selected set of variables consisted in i) type of land clearance, ii) absence or presence of burning, iii) type of soil preparation, iv) intensity of nitrogen use, v) type of weed control and vi) form of sales (grain or cob). Other variables were kept as supplementary ones and their projections in factorial plans were further used to support interpretation of cropping system types.
We carried out HCA based on the loadings score of the first 3 factorial components that together explained 71% of the adjusted inertia to identify most frequent combinations of management practices. We interpreted our results in terms of maize cropping systems by examining the frequency of each class of management practice within resulting clusters at different truncation levels (3 to 7). We limited the number of maize cropping systems to 3 main types and 6 sub-types as the optimal threshold between specificity of management practice classes within clusters, cluster compacity and added interpretation value from further clustering compared to parent node.

2.5.3. CART classification analysis

We performed classification analysis with the aim to i) identify drivers of the diversity of maize cropping system and ii) explore the relative contribution of each identified driver to the present diversity of cropping systems. We used a set of variables related to territory characteristics, farm type, farmer socio-economic characteristics and plot biophysical conditions (Table III-2).

Variables included permanent factors such as elevation and position within the landscape and dynamic factors such as population density or inherited plot fertility. We computed the analysis for the subset of plot samples whose subtypes of cropping systems have been previously determined (n=642). The software used looks for prediction of a categorical variable using binary partitioning rules which are based on threshold in predictor variables (Steinberg and Colla, 1997).

It has several advantages over other methods including (i) the absence of assumption on necessary data distribution, (i) the possibility to analyze the impact of mixed of categorical and continuous variables, (iii) no sensitivity to outliers, multi-colinearity, heteroskedasticity, or distributional error structures and (iv) capacity to reveal various interactions (Tittonell et al., 2008a). It is thus particularly adapted to analysis of skewed datasets with multiple outliers and missing data as those frequently produced by farm and field surveys.

Classification analysis was computed following four models, each corresponding with a specific assumption on the main determinants of cropping system diversity. The first model assumed that diversity of maize cropping systems was driven by territory characteristics at village, ecoregion and district scale. The second model assumed that it was determined by farm type and farmer socio-economic conditions and the third one by biophysical field conditions. The fourth model considered that diversity of cropping system was determined by all those drivers combined.

Combinations of variables were screened for each model to select those providing trees that minimize model error and maximize prediction of cropping system types. We used Gini splitting criterion and 10-fold cross validation with penalties to minimize importance of missing value for few variables (distance from home and source of water). More details on classification analysis process can be found in Steinberg and Colla (1997).

The analysis provided an optimal tree classification and a range of alternative trees based on the same variables at different trimming levels that are not statistically different, of which the smallest one is of particular interest. We interpreted determinants of cropping systems only when more than 50% of cases of a given cropping system subtype were classified correctly from a combination of hypothesized variables under a classification tree.

2.5.4. Performances of maize based cropping systems

We selected upon end-user value (practical use for diagnosis purposes) a set of 13 field-scale assessment indicators (Table III-3) reflecting the main sustainability attributes of cropping systems and covering the socio-economic and agro-environmental dimensions of agricultural sustainability (Lopez-Ridaura et al., 2002; Rasul and Thapa, 2003). We used return to land, labor and input costs as the main indicators for economic profitability. We used yields, N- fertilizer agronomic and recovery efficiencies (Ladha et al., 2005) for agronomic productivity. Agro-economic dependency was assessed from labor and nutrient use intensities while frequency of maize cultivation on a field over the past 5 years was considered an indicator of agro-environmental diversity.

Table III-2. Variables used in the CART analysis to analyze drivers of cropping systems

Category	Variable name	Description
Site	District	Location within Son La province: Mai Son or Moc Chau district
	Ecoregion	Village location / agro-ecological zones grouped in 5 main classes: Low elevation plain, low elevation steep slopes, medium elevation hills, high elevation plateau, high elevation mountains
	Elevation	Village elevation class: Low (<700 m asl), Intermediate (700 - 1000 m asl), High (> 1000 m asl)
	Mean farm size	Mean farm size at village level
	Irrigated rice	Presence of irrigated rice (1 or 2 crops) in the village
	Industrial crops	Presence of industrial crops in the village (i.e. tea, coffee, sugar can, whose cultivation is supervised by local factories also ensuring commercialization
	Population density	Population density class at commune level: Low (<70 hab.km^{-2}) High (> 70 hab.km^{-2})
	Accessibility	Accessibility class of the village (ranked by interviewers): Easy, Difficult
	Diversification	Village agricultural diversification class: Specialized in maize production, Specialized in industrial crop (tea, coffee, sugar can), diversified
Farm type	Farm type	Farming system type as previously defined from Principal Component Analysis complemented by Hierarchical Cluster Analysis
	Wealth rank	Farm wealth score as ranked by surveyors P=poor, M=Medium, R=Rich
	Pigs and goats	N° of pigs or goats raised: None, A few (<5), Many (>5)
Farmer	Ethnicity	Ethnicity: 'Kinh', 'Thai', 'Hmong', or 'other minority' (Dao, Kho Mu, Xinh Mun)
	Farmer's age	Farmer's age grouped into 3 class evenly distributed: Young (<35 years), Middle (35-55), Old (>55 years)
Field biophysics	Landscape	Field position within local landscape: LL = Lowland, FS = Foot-slope, SH = On hilly slopes, MS = On non-hilly slopes, TS = Top slope
	Slope	Farmers' appraisal of field steepness classified as 1 (flat) 2 (gently undulating), 3(slope) and 4 (steep slopes). Each farmer classified their own fields.
	Fertility	Farmers' appraisal of soil fertility. Each farmer classified their own fields as Highly fertile (4), Fertile (3), Below-average (2) Very poor (1).
	Plot surface	Size of maize plot, divided into 3 class evenly distributed 'Small' (<0,3 ha) 'Medium' (0,3 – 1 ha) and 'Large' (>1ha)
	Stone density	Farmers' appraisal of stone density 1= none (presence of stones on less than 30% of the surface), 2 = average (presence of stones present on 30-70% of the surface) 3 = lots (presence of stones on more than 70% of the surface)
	Soil color	Farmers' appraisal of field dominant color regrouped into 5 classes : Black, Grey, Red, Yellow, Yellow Red
	Water distance	Walking distance to the closest source of water: <30 mn, >30 mn
	Home distance	Walking distance to farmer's home: <30 mn, >30 mn
	Plowability	Feasibility of plowing by animal traction: Not plowable, Partly plowable, Plowable

Table III-3. Indicators used to assess cropping system sustainability performances

Attribute	Criteria	Indicator (Unit)	Description	Threshold indicator (value)
Productivity	Agronomic productivity	Maize yield (kg grain.ha^{-1} at 14% moisture)	Declared surface was checked for consistency with quantities of maize grain sown. Production sold in cob was converted into grain using the mean rate of 77,5% and mean moisture at harvest of 31,9 %	Mean maize yield among surveyed fields (6600 kg grain.ha^{-1} at 14% moisture)
		N- fertilizer agronomic efficiency (kg grain.kg N applied^{-1})	Grain production / N applied	Mean value of 40 kg grain / kg N applied with increase in grain production of 18-25 kg/ kg N applied (Ladha, 2005)
		N- fertilizer recovery efficiency (%)	Estimated from N grain uptake (using mean value of 14 g N.kg grain^{-1}) to N applied	Usual range from 10 - 70% (Ladha, 2005)
	Economic profitability	Return to labor (USD.working day^{-1})	Economic calculations were done considering average prices surveyed. Return to land, labor & capital were computed i/ excluding labor costs (thus considering any agricultural activity as performed by family members).and ii/ including all labor costs valorized at mean daily wage for agricultural workers	Daily price for waged worker in the region (5 US$.day^{-1})
		Return to land (USD.ha^{-1})		Mean annual lease price for maize fields - survey (700 US$.ha^{-1}.year^{-1})
		Return to input cost (USD.USD^{-1})		Vietcombank 1-year fixed deposit interest rates (14% for deposit in VND)
Stability, resilience, reliability	Agro-environmental vulnerability	Maize-related farm gate nutrient balance (kg N.ha^{-1}, kg P_2O_5.ha^{-1}, kg K_2O.ha^{-1})	Nutrients uptake in maize grain – nutrients applied, using mean nutrient rates of 14 g N.kg grain^{-1}, 5 g P_2O_5.kg grain^{-1} and 7g K_2O.kg grain^{-1} (Ladha et al., 2005)	Farm gate N balance complying with European Nitrate Directive (150 kg.ha^{-1}) (Nevens et al., 2006; Fangueiro et al., 2008) Farm gate P balance highly negative (<-20), negative (-20<x<-10), neutral (-10<x<10), positive (20>x>10), highly positive (>20). Highly positive P balance may cause eutrophication risks (Lord Eunice, 2010) Neutral farm gate K_2O balance as an indicator of removal risk (0 kg K_2O.ha^{-1})
		Intensity of herbicide use (g. a.i. ha^{-1}.year^{-1})	Assessed from total dose of commercial products sprayed over one year	Atrazine: maximum application allowed in the USA on erodible bare soils (1750 g a.i. ha^{-1}) Paraquat: maximum recommended dose stated by FAO (1120 g a.i. ha^{-1}) Glyphosate: maximum dose for pre-emergence application complying with US good agricultural practices (4200 g a.i. ha^{-1})
		Erosion index	Index aggregating steepness of slope (4 classes from 1 = flat to 4 = steep) x burning prior to sowing (2 classes: 1 = no burning; 2 = burning) (Valentin et al., 2008)	Scores of 1 and 8 respectively represent a flat / steep land without / with burning of residues prior to sowing.
	Agro-environmental diversity	Frequency of maize cultivation (%)	Assessed from cropping patterns over 5 past years	
Self-reliance	Agro economic dependency	Intensity of nutrient use (kg N.ha^{-1}, kg P_2O_5.ha^{-1}, kg K_20.ha^{-1})	Assessed from declared doses of fertilizers applied on maize field	
		Frequency of herbicide use (%)	% cases within the subtype of cropping system	
		Labor requirements (working days)	Assessment included i/ transportation to storage / selling place and ii/ threshing when implemented by farmers	

Regarding agro-environmental vulnerability, we used the following indicators : nutrient balances, intensity of herbicide use and a composite index of erosion risk, aggregating the steepness of the slope and a ranking of practices regarding the extent to which they favor erosion as assessed by Valentin et al. (2008) in their general review on erosion factors in continental South East Asia. We defined reference threshold values from literature. We calculated these indicators for each identified cropping system on a subset (n=463) excluding outliers for yields, surface and intensities of input and herbicide uses. We compared mean values of those indicators among cropping system types by computing Kruskal Wallis test at p=0.05 and p=0.01.

3. Results

3.1. Identification of farm types

We performed PCA on farm-scale socioeconomic variables complemented by HCA to obtain 5 farm clusters. We interpreted the clusters differing by mean values of farm scale characterization variables reflecting resource endowments (Table III-4a), livelihoods and economic performances (Table III-4b) to build a typology of farming system based on farm economic wealth, farmer priority objectives, constraints in access to means of production, short-term strategies to deal with those constraints, main livelihood and long-term positioning (Table III-5).

Farm types A and B represented young under-resourced farmers constrained mostly by land and capital, with weak access to mechanized traction. Farmers of type A had the lowest land/labor ratio and relied on off-farm activities to supplement household income, thus exacerbating labor constraints for their farming activities. Farmers of type B relied exclusively on specialized agriculture, mostly upland crops (maize and cassava or canna). Perennial crops (tea, coffee or sugar cane) accounted in average for 16% of their farmed area. They matched peak labor needs using labor exchange with other farmers. Both types faced a number of sustainability issues, among which the most critical in the short term was high economic vulnerability with low capacity to mobilize capital and mitigate market risks. Hence, the average income earned by those farmers was below the international poverty threshold (1.25 US$.person^{-1}.day^{-1}).They also earned a lower income than they would have earned if permanently employed at the minimum legal wage (70 US$.month^{-1}.worker^{-1}).

Farm type C had low to moderate resource endowment with access to animal traction and medium to large-scale animal systems. They had access to permanent sources of non-farm income (mainly permanent employment, political responsibilities or retirement pension). They were mainly constrained by access to land of which an average of 30% was under perennial industrial crops (tea, coffee or sugarcane). They had access to the most important diversity of non-farm income sources among all farm types.

Farm types D and E had moderate to high resource endowment (land and capital). Farmers of type D relied on intensive use of inputs for cropping systems and managed intermediate-scale animal systems. They overcame labor constraints by hiring workers, on whom they were more dependent than other farm types. They had the highest proportion of sloping fields and thus were the most dependent on cropping systems developed on slopes while facing the highest risks of nutrient losses from erosion. Farmers of type E incorporated economic diversification. Farmers were older, mainly constrained by labor, and overcame it by hiring labor force. Like farmers of type C, they had a high diversity of income sources but their activities required more investment and/or were more profitable. They engaged in non-farm activities (political responsibilities, skilled agricultural services such as transportation, input and loan delivery and large-scale trading or processing), large-scale intensive animal systems (mainly pig and poultry) or both non-farm and large scale animal systems, and cultivated few perennial crops.

Table III-4a. Mean values of a selection of farm-scale characterization variables reflecting farm resource endowment

Farm type	n=	Land						Labor				Animal traction		Capital
		Total farmed land (ha)	Of which: Maize (ha)	Of which: Cassava & canna (ha)	Of which: Perennial crops (%)	Of which: Upland rainfed annual crops (%)	Land Labor Ratio (ha. equivalent full time farm familial active^{-1})	Mouths to feed (n°)	Household members >16 y. old (n°)	Amount paid for hiring external workers (US$)	Age of household's head	Animals for traction (cattle, buffalo & horses) (n°)	Asset value of equipment and animals for traction (US$)	Asset value of buildings, equipment & livestock (US$)
Moc Chau														
A	39	1.16 a	0.62 a	0.13 ab	25 bc	70 ab	0.46 a	5 ab	4 b	99 a	43 b	1 ab	378 ab	828 a
B	25	1.34 a	0.88 ab	0.17 bc	17 b	80 bc	0.64 a	4 a	3 a	39 a	36 a	1 a	202 a	509 a
C	54	2.18 b	1.13 bc	0.27 c	23 c	70 a	0.71 b	5 ab	4 b	43 ab	45 b	2 c	1302 c	2212 bc
D	37	2.59 b	2.27 d	0.07 a	3 a	92 c	1.04 c	5 a	4 ab	375 b	40 ab	1 bc	511 b	1541 b
E	9	3.60 b	2.40 cd	0.36 bc	13 bc	76 abc	1.00 bc	7 b	5 b	190 ab	44 b	3 c	2476 c	4285 c
Mai Son														
A	43	1.17 a	0.65 a	0.26 a	22 b	75 b	0.47 a	4 a	3 a	36 a	37 a	1 a	544 a	1586 a
B	33	1.61 a	0.73 a	0.65 a	14 ab	82 b	0.69 b	4 a	3 a	46 a	34 a	0 a	257 a	879 a
C	52	1.64 a	0.70 a	0.17 a	42 c	53 a	0.50 ab	5 b	4 b	79 a	44 b	2 b	1781 b	4998 b
D	17	2.60 b	1.63 b	0.36 a	16 ab	81 b	1.16 c	5 ab	3 ab	303 b	37 ab	1 a	746 a	1861 a
E	50	3.39 b	2.75 b	0.30 a	4 a	90 b	1.12 c	5 b	4 b	456 b	46 b	2 b	2308 b	7504 b
All														
A	82	1.17 a	0.64 a	0.20 ab	23 b	73 b	0.46 a	5 a	3 ab	66 a	40 a	1 ab	465 ab	1226 ab
B	58	1.49 a	0.79 ab	0.45 b	16 b	81 bc	0.67 b	4 a	3 a	43 a	35 a	0 a	234 a	720 a
C	106	1.91 b	0.92 b	0.22 b	32 c	61 a	0.61 b	5 b	4 d	61 a	44 bc	2 c	1537 c	3579 c
D	54	2.59 c	2.07 c	0.16 a	7 a	89 c	1.08 c	5 ab	4 bc	353 b	39 ab	1 b	585 b	1642 b
E	59	3.42 c	2.70 c	0.31 b	5 a	88 c	1.10 c	6 b	4 cd	415 b	46 c	2 c	2333 d	7013 d

Letters indicate significant different performances among farm types (Kruskal Wallis, Dunn method, Benferonni correction) at p=0.05

Table III-4b. Mean values of a selection of farm-scale characterization variables reflecting household livelihood and farm economic performances

Farm type	Yearly household income				Total amount yearly invested for farming (US$)	Number of livelihood sources				Poverty ratio (household income / world bank poverty threshold)	Labor opportunity income ratio (household income / [minimum legal salary x n° household active workers]
	Total (US$)	Farming activities (US$)	Non-farm (US$)	Off-farm (US$)			Of which farming	Of which animal systems	Of which cropping systems		
Moc Chau											
A	2428 a	1106 a	1191 b	245 b	721 a	6 a	4 a	1 a	3 ab	1.2 a	1.0 a
B	1445 a	1425 a	15 a	5 a	679 a	5 a	4 a	1 a	3 ab	0.8 a	0.7 ab
C	3405 b	2729 b	651 b	45 a	1267 b	9 b	7 b	3 b	5 c	1.4 b	1.1 bc
D	4257 b	4043 b	140 a	0 a	2552 c	5 a	4 a	2 a	2 a	1.9 b	1.6 c
E	5485 b	4752 b	733 b	0 a	2477 bc	9 b	7 b	3 b	4 bc	1.8 b	1.5 c
Mai Son											
A	1640 a	1312 a	198 a	126 b	808 a	5 b	4 a	1 a	3 a	0.9 ab	0.8 ab
B	1033 a	977 a	46 a	0 a	541 a	4 a	4 a	1 a	3 a	0.6 a	0.5 a
C	3204 b	2929 b	263 b	12 a	1484 b	8 c	7 b	3 b	4 b	1.3 bc	1.1 bc
D	3666 bc	3499 bc	136 ab	1 a	1718 bc	5 ab	4 a	1 a	3 a	1.7 cd	1.6 cd
E	5200 c	4386 c	755 b	45 a	2565 c	7 c	6 b	3 b	3 a	2.5 d	1.9 d
All											
A	2015 a	1214 a	670 bc	183 b	767 a	6 b	4 a	1 ab	3 b	1.1 a	0.9 a
B	1210 a	1170 a	32 a	2 a	600 a	4 a	4 a	1 a	3 b	0.7 a	0.6 a
C	3307 b	2287 b	461 c	29 a	1373 b	8 d	7 c	3 c	4 c	1.4 b	1.1 b
D	4071 bc	3871 bc	139 ab	0 a	2289 c	5 ab	4 a	2 b	2 a	1.9 bc	1.6 c
E	5244 c	4442 c	752 c	38 a	2552 c	7 c	6 b	3 c	3 b	2.4 c	1.8 c

Letters indicate significant different performances among farm types (Kruskal Wallis, Dunn method, Benferonni correction) at p=0.05

Table III-5. Farm typology on a structural and functional basis.

Type	Economic wealth	Priority objective	Means of production		Farm long-term strategic orientations	Main livelihoods	Strategies to overcome constraints
			Resources	Constraints			
A (n=82)	Most insecure poor	Subsistence; supplement farm income	Labor	Land, capital (Labor)	Constrained agricultural specialization	Small-scale cropping and animal systems	Migration, selling labor
					Economic diversification	Off-farm, seasonal employment, official poverty-focused programs	
B (n=58)	Poor	Market; mitigate risk	Labor, (land)	Capital	Agricultural diversification	Extensive small-scale animal systems. Intermediate-input-level cropping systems	Contract farming, loans
C (n=106)	Intermediate	Market; mitigate risk	Labor, capital	Land	Economic diversification	Permanent or seasonal employment. Temporary services to agriculture. Small-scale trading or processing	Rent or buy land
D (n=54)					Agricultural intensification	High-input-level–based cropping systems. Intermediate-scale intensive animal systems (pigs)	
E (n=59)	Richest	Market; earn further income	Land, capital	Labor	Economic diversification	Large-scale trading, agricultural product processing, cash or input provider	Motorization, hiring daily or seasonal workers, rent out land or equipment
					Market-driven agricultural specialization	Large-scale intensive animal systems (cattle, poultry, pigs) and cropping systems	

The identified farm types and their differences in economic performances remained unchanged across districts. Farmed area, farm wealth and/or yearly investment above 5 percentile due to highly specific agricultural activities and businesses were the main reason for discarding outliers from analysis both at Mai Son (20 out of 34 outliers) and at Moc Chau (8 out of 18 outliers). The frequency of types A, B and C was similar across districts. Type D was more frequent at Moc Chau and type E at Mai Son.

3.2. Identification of cropping systems

We firstly identified correlated maize management practices from MCA (Fig.3a & 3b). Burning was associated to manual land clearance and manual weeding. Motorized slash and clear was associated to absence of burning and chemical weed control by glyphosate. High N fertilization intensity was associated to sales of maize in form of grains and mechanized plowing (animal traction or two wheels-tractors). Low N, P and K fertilization intensities were correlated to manual soil preparation and to sales of cobs. Cultivars CP888, LVN10 and NK4300 were more often sown by farmers applying N at low intensity. Sowing of cultivars NK54 or DK9901 was associated to N application at highest intensity and animal plowing while cultivars NK 66-67 and CB 919 were associated to non-burning and use of herbicide. We subsequently differentiated 6 subtypes of maize cropping systems from interpretation of clusters corresponding to various combinations and frequencies of management practices. These subtypes differed by land clearance strategies (motorized or manual slashing with or without burning), land preparation (mechanized or manual), weed control before and after sowing (chemical or manual), N-fertilizer intensity (low, medium, high) and sales of maize in forms of cobs or grains (Figures III-3a, III-3b & Table III-6).

Figure III-3a. Projection of classes of categorical variables corresponding to maize cropping systems in the factorial plan of a multiple component analysis (F1 & F2). Stars localize types of cropping systems as identified from hierarchical clustering and arrows sub-types. Active variables with normal font (discs), supplementary ones in italics (squares), cropping systems (=CS) in capitals.

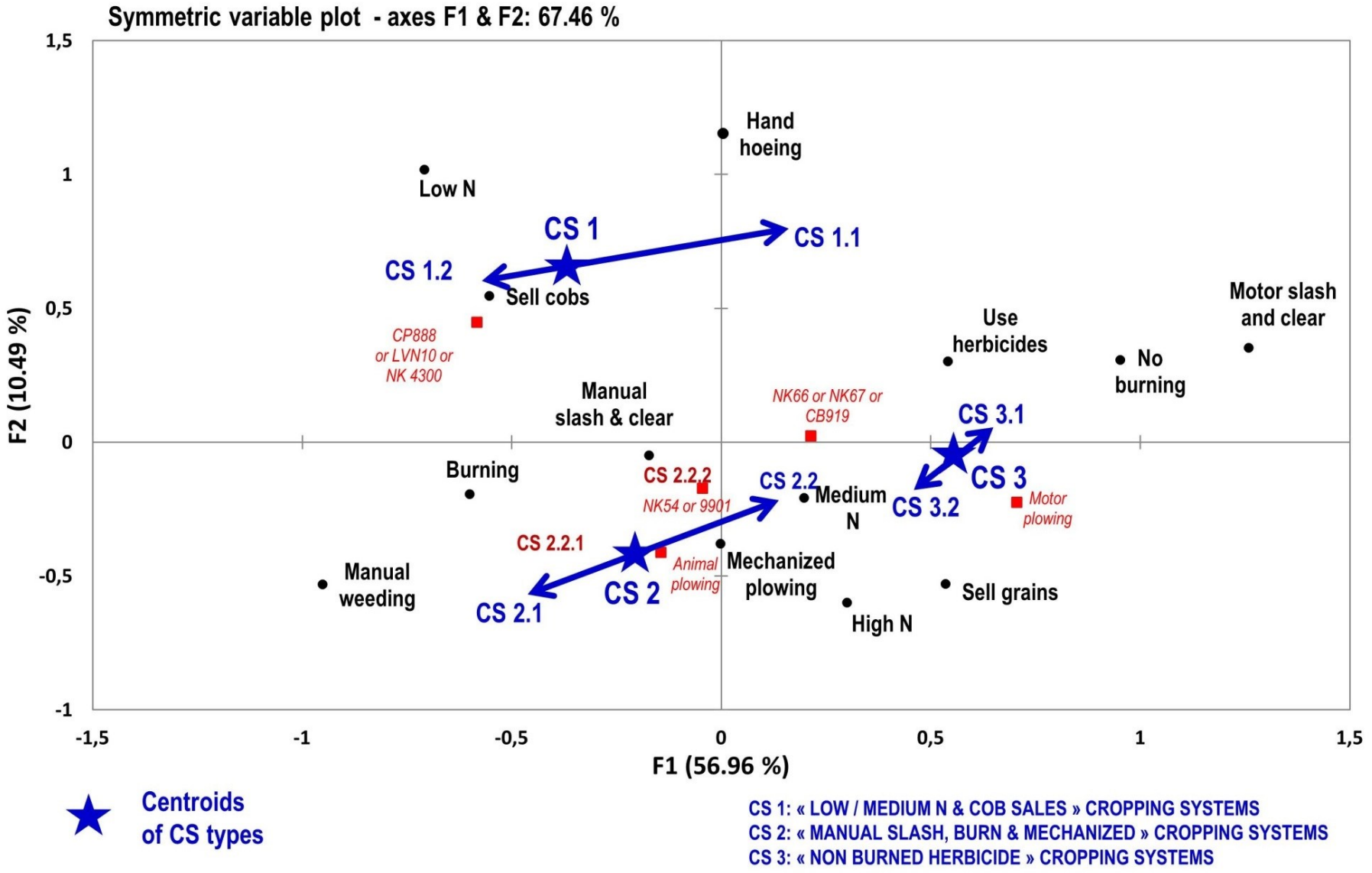


Figure III-3b. Projection of classes of categorical variables corresponding to maize cropping systems in the factorial plan of a multiple component analysis (F2 & F3). Stars localize types of cropping systems as identified from hierarchical clustering and arrows sub-types. Active variables with normal font (discs), supplementary ones in italics (squares), cropping systems (=CS) in capitals.

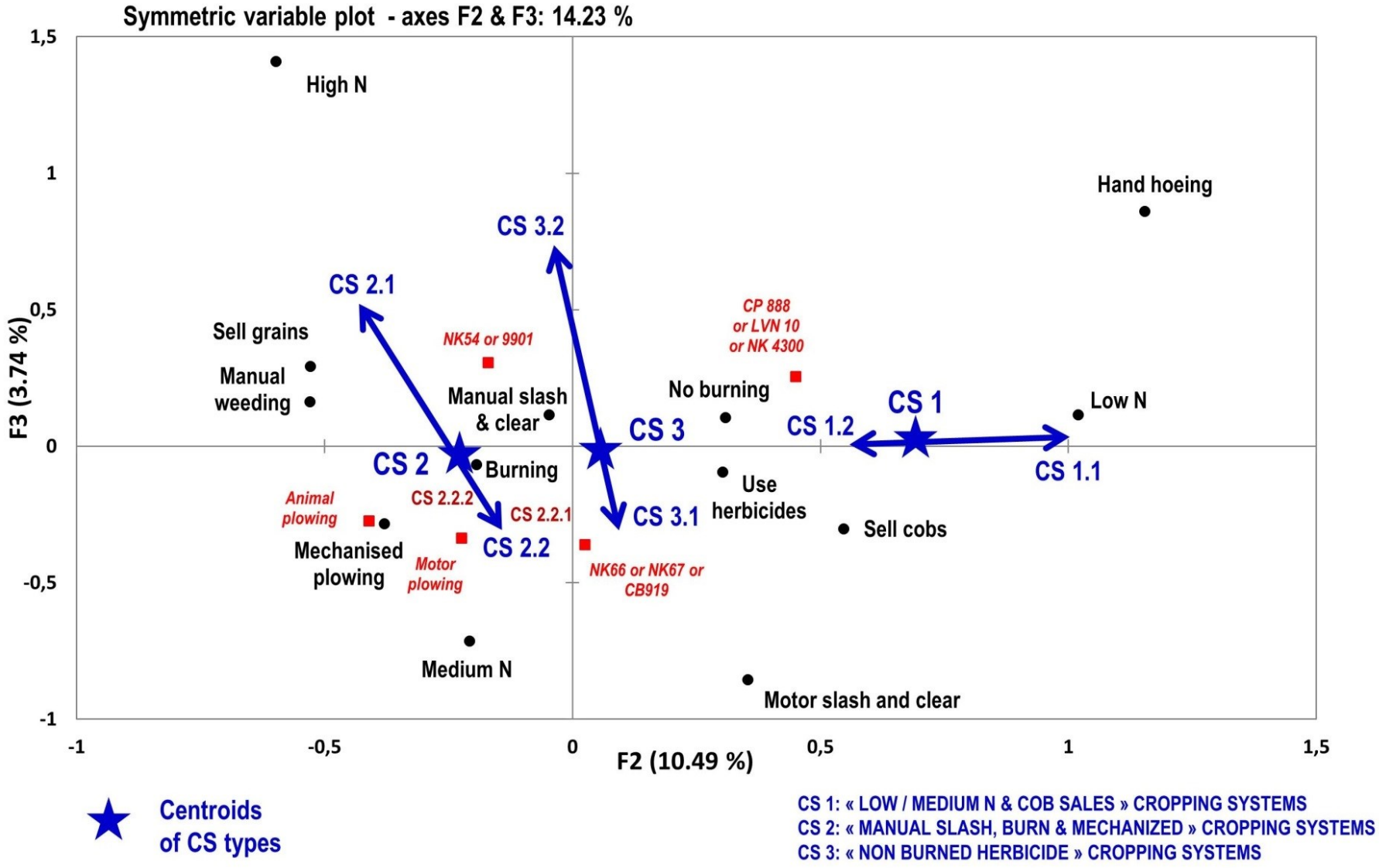


Table III-6. Characteristics of cropping systems types and subtypes as resulting from multiple correspondence analysis complemented by hierarchical clustering.

Cropping system qualifiers			Cluster	n=	Crop management practices (In brackets frequency within a cluster)					
Type	Subtype	Sub-subtype			Slash and clear	Burning	Plowing	N-Fertilizer intensity	Weed control	Form of sales
The "low/medium N - cob sales" systems	No burning, manual plowing & herbicide use		[1.1]	43	Manual (79) Motorized (21)	Yes (30) No (70)	Manual (86), mechanized (14) of which buffalo (9), motor (5)	Low (51) Medium (49)	Manual (5) Herbicide (95)	Cob (98) Grain (2)
	Burning, manual slash & clear		[1.2.]	106	Manual (100)	Yes (92) No (8)	Manual (46), mechanized (54) of which buffalo (49), motor (5)	Low (89) Medium (11)	Manual (56) Herbicide (44)	Cob (100)
The "manual slash, burning and mechanized" systems	Manual weeding & high N intensity		[2.1.]	75	Manual (100)	Yes (100)	Manual (12) mechanized (88) of which buffalo (83), motor (5)	Low (20) High (80)	Manual (100)	Cob (31) Grain (69)
	Low to medium N intensity		[2.2.]	179	Manual (99) Motorized (1)	Yes (90) No (10)	Manual (3) mechanized (97) of which buffalo (89), motor (8)	Low (11) Medium (87) High (2)	Manual (49) Herbicide (51)	Cob (52) Grain (48)
	Of which	*Manual weeding*	*[2.2.1.]*	*82*	*Manual (100)*	*Yes (100)*	*Manual (0), mechanized (100) of which buffalo (95), motor (5)*	*Medium (100)*	*Manual (100)*	*Cob (55) Grain (45)*
		Chemical weeding	*[2.2.2.]*	*97*	*Manual (98) Motorized (2)*	*Yes (80) No (20)*	*Manual (5) mechanized (95) of which buffalo (85), motor (10)*	*Low (20) Medium (76) High (4)*	*Manual (10) Herbicide (90)*	*Cob (48) Grain (52)*
The "Non burned – herbicide users" systems	Mechanized slash, clear, plow & medium N intensity		[3.1.]	153	Manual (62) Motorized (38)	Yes (15) No (85)	Manual (12), mechanized (88) of which buffalo (58), motor (30)	Low (3) Medium (92) High (5)	Herbicide (100)	Cob (30) Grain (70)
	High N intensity & sales of grains		[3.2.]	86	Manual (90) Motorized (10)	Yes (30) No (70)	Manual (47), mechanized (53) of which buffalo (41), motor (12)	Low (3) High (97)	Manual (6) Herbicide (94)	Cob (7) Grain (93)

The type “low-medium N - cob sales” represented cropping systems with the lowest intensification level. Within this group, farmers who hoed without prior burning consequently used herbicide to control weeds (hereafter referred as subtype 1.1) while those who operated a manual sequence of slashing, clearing, and burning generally applied N at low intensity (subtype 1.2).
The second combination of management practices was dominated by manual slashing, clearing, burning and mechanized plowing. Within this group, farmers who implemented manual weeding generally applied N at high intensity (subtype 2.1) while others applied N at low to medium intensity (subtype 2.2)
The third combination of management practices represented cropping systems with infrequent burning and systematic use of herbicide. Within this group, farmers operating frequently motorized land clearance and mechanized plowing applied N at medium intensity (subtype 3.1) while those applying N at high intensity mostly sold maize in form of grains (subtype 3.2).

3.3. Identification of the most discriminant drivers of cropping system diversity

3.3.1. CART model 1: cropping system as a function of territory characteristics.

The optimum tree for cropping system classification as a function of territory characteristics had 8 terminal nodes (Figure III-4a). This model was based on 4 variables out of 9: Ecoregion, district, mean farm size and presence of irrigated rice at village level. Ecoregion was the first criteria to discriminate between maize systems, followed everywhere, except on high elevation plateau (Moc Chau), by mean farm size which reflected population density at village level. Presence of industrial crops at village level, population density class at commune level, village elevation, accessibility and diversification classes were not selected as splitting criteria. Model 1 whose global relative error was 0.73 allowed predicting subtypes with prediction success (p) of 63% for subtype 1.1, 73% for subtype 2.1 and 63% for subtype 3.1.

3.3.2. CART Model 2: cropping system as a function of farm types and farmers socioeconomic conditions

Farm type as a single explanatory variable failed to predict any subtype of cropping system (not shown) and model relative error remained high (RE=0.83). We therefore rejected our assumption of direct relationship between farm types and cropping systems. The use of PCA variables formerly grouped into classes of even distribution instead of farm types (data not shown) did not lower much model error (Model 2A, RE=0.73) but allowed to fairly predict cropping systems 1.1 (63%), 3.2 (59%) and 3.1 (53%) from 2 variables out of 16 (farm asset value and annual investment in farming activities).
Integrating categorical socioeconomic variables such as ethnicity with farm type did not change model relative error (Model 2B, RE=0.72) but allowed, from those 2 variables out of 5 (including also apparent farm wealth, intensive pig raising and settlement anciently), to predict “non-burned – herbicide” cropping systems. Subtypes 3.1 and 3.2 were therefore respectively correctly predicted in 65% and 59% of cases) (Figure III-4b).

3.3.3. CART Model 3: cropping systems as a function of field biophysical conditions

The optimum tree for cropping system classification as a function of biophysical conditions had 10 terminal nodes (Figure III-4c). It was based on 5 variables out of 9: plowability, soil color, landscape, fertility, and distance from home. Size of maize fields was not selected as a splitting criterion, indicating that combinations of management practices were independent from field size.

Plowability was the primary criteria to differentiate cropping systems. Fields that were not plowable by animal traction were further differentiated according to fertility classes. Fields that were at least partly plowable by animal traction were further discriminated into those at close walking distance and those far from home. Although model relative error remained high (RE=0.72), this classification tree allowed to fairly characterize cropping system subtypes 1.1 (58%), 2.1 (59%) and 3.1 (65%).

3.3.4. CART Model 4: cropping system as a function of territory characteristics, farm/farmers characteristics and field biophysical conditions

The optimum classification tree for cropping systems as a function of biophysical conditions, site and farm type had 13 terminal nodes (Figure III-4d). It was based on 6 variables out of 23: ecoregion, plowability, district, landscape, soil color and farm type. Relative error of the classification model improved but remained high (RE=0.56) mainly due to the lack of correct prediction for cropping system 2.2, other cropping systems being predicted correctly by the model in up to 73% of cases. Territory-specific variables (ecoregion and district) remained the primary splitting criteria, followed by plot biophysical characteristics then farm types.

3.4. Relationships between cropping systems, territory characteristics, farm types, farmers' socioeconomic characteristics and field biophysical conditions

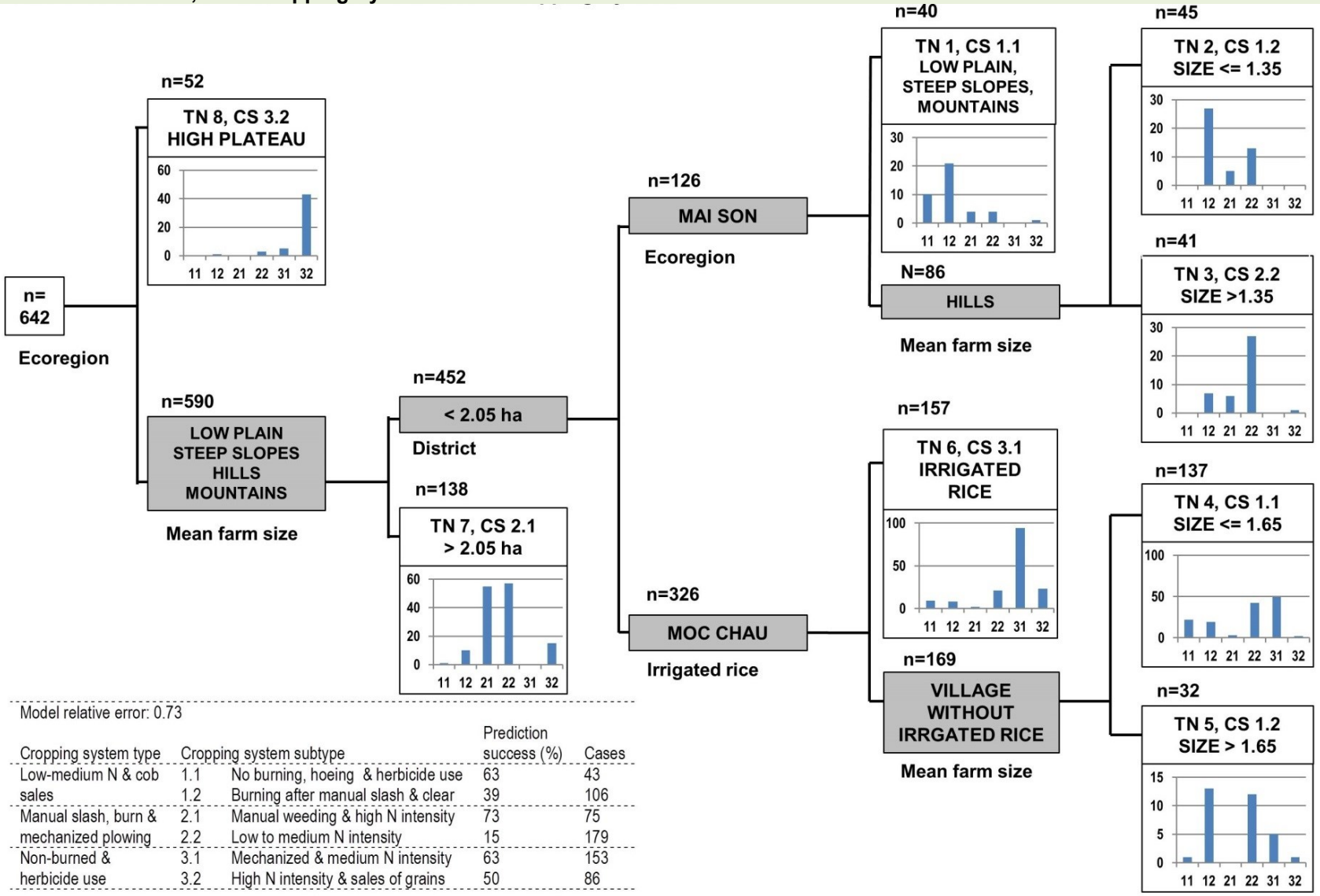
Among "low-medium N - cob sales" cropping systems, subtype 1.1 (No burning, hoeing and herbicide use) was implemented in mountainous ecoregion of Mai Son district (Model 4), in villages where mean farm size was below 2.05 ha. It was also found in any ecoregion of Moc Chau district except on high plateau, in villages without irrigated rice and where mean farm size was below 1.65 ha (model 1). This cropping systems was associated to resource-poor farmers (Model 2A), including farmers of type A in hilly and mountainous ecoregions of Moc Chau, cultivating non-yellow soils and fields where animal plowing was hardly feasible (Model 4). Most farmers were implementing this cropping system on fields where animal traction was not feasible. These fields were ranked of highest fertility if located on hilly slopes and of lower fertility elsewhere. Fields ranked of lower fertility either had yellow-red soils or were located on long non-hilly slopes (Model 3). In Mai Son, this cropping system was implemented on fields at the bottom or along non-hilly slopes while at Moc Chau, it was carried out on non-red soils (Model 4).

Cropping system 1.2 (manual slash, burning and low N intensity) was found in mountainous and hilly ecoregions of Moc Chau and Mai Son and was mainly associated with fields where animal traction is hardly feasible or not feasible. It was practiced on yellow soils in Moc Chau and on sloping fields on hilly slopes or at the top of slopes in Mai Son (Model 4).

Among "manual slash, burning and mechanized" type, cropping system 2.1 (manual weeding and high N intensity) was found in low elevation ecoregions at Mai Son (Model 4) and in any ecoregion of Moc Chau excluding high elevation plateau (Model 1). It was practiced in any village where mean farm size was higher than 2.05 ha (Model 1). Farmers were implementing this cropping system on fields where plowing by animal traction is at least partly feasible, on red and black soils for fields located far from home and on fields of below-average fertility for those close to home (Model 3).

Among "non-burned – herbicide" cropping systems, subtype 3.1 (frequent motorized slash and clear, mechanized plowing and medium N application) was implemented in any ecoregion of Moc Chau except the high elevation plateau, on villages having irrigated rice production and mean farm size below 2.05 ha (Model 1). It was implemented by Thai, Daos, Kho Mu or Xin Mun farmers whose farm types were classified C or D (Model 2B).

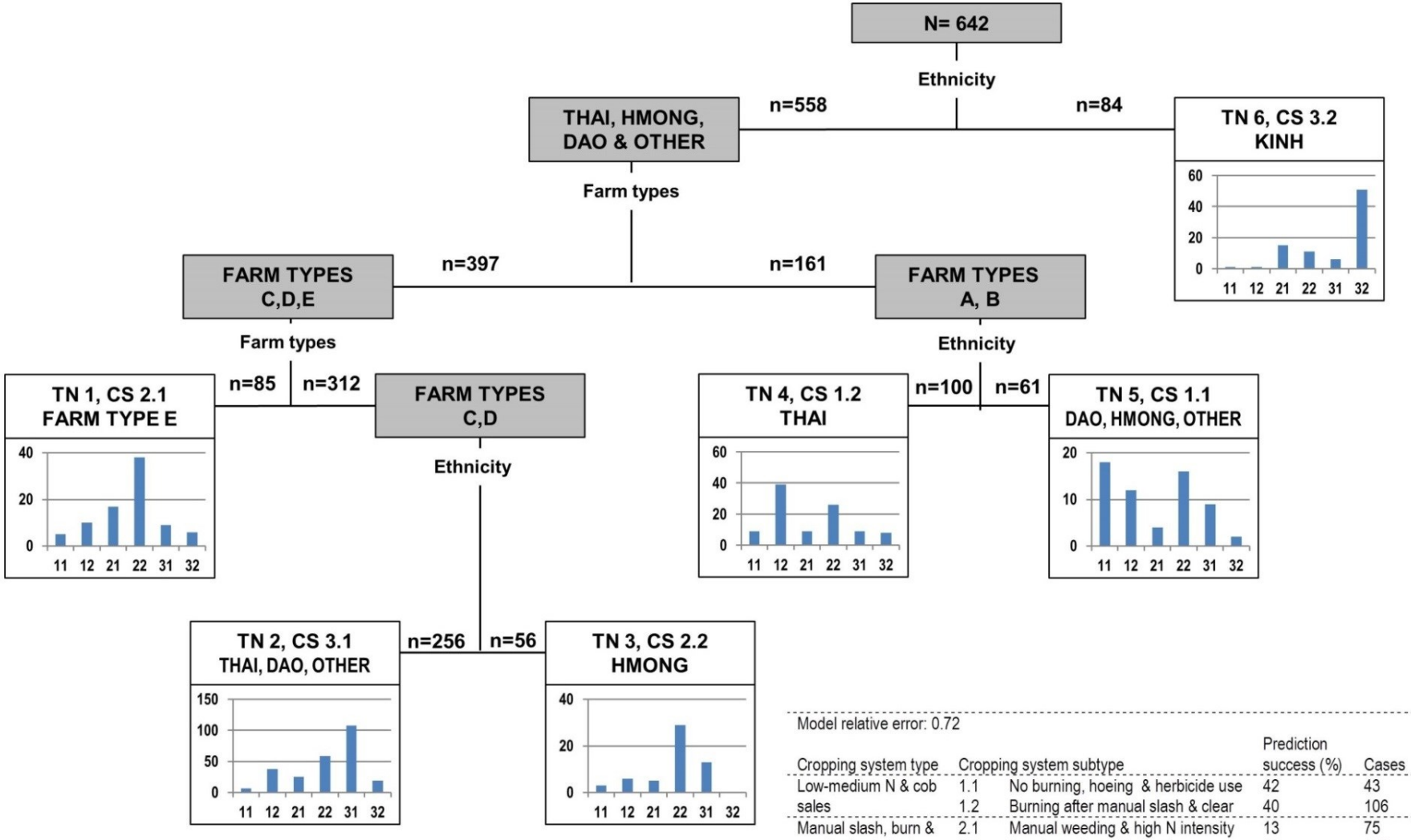
Figure III-4a. Classification tree model 1 describing cropping systems as a function of site-related factors. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. Splitting criteria is given below each node and selected modalities of criteria are given in child nodes. In terminal nodes are given node number, dominant cropping system, histograms representing frequency of each cropping system within the terminal node. TN = Terminal node, CS = Cropping System.



Model relative error: 0.73

Cropping system type		Cropping system subtype	Prediction success (%)	Cases
Low-medium N & cob sales	1.1	No burning, hoeing & herbicide use	63	43
	1.2	Burning after manual slash & clear	39	106
Manual slash, burn & mechanized plowing	2.1	Manual weeding & high N intensity	73	75
	2.2	Low to medium N intensity	15	179
Non-burned & herbicide use	3.1	Mechanized & medium N intensity	63	153
	3.2	High N intensity & sales of grains	50	86

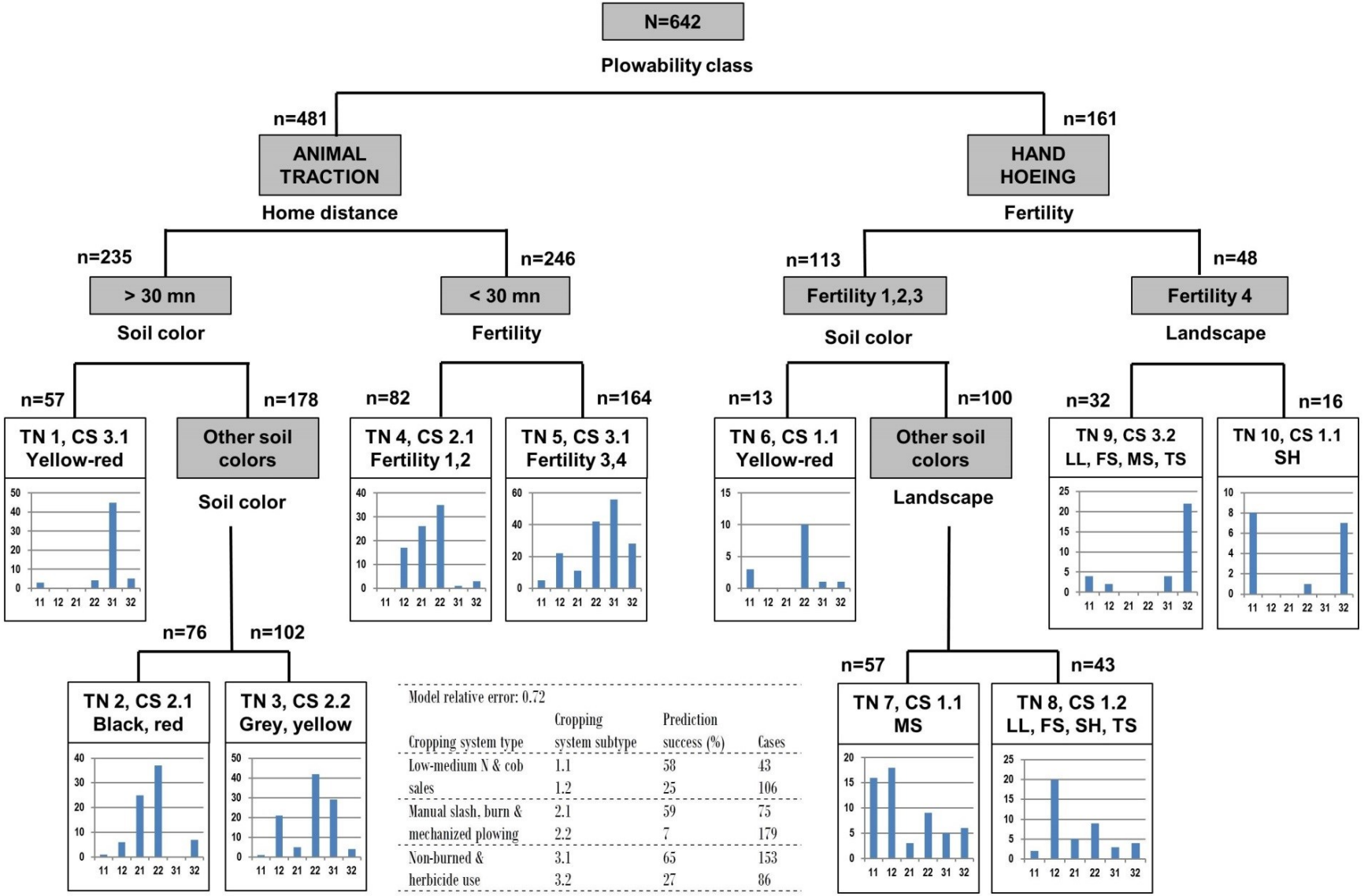
Figure III-4b. Classification tree model 2B describing cropping systems as a function of ethnicity and farm type. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. Splitting criteria is given below each node and selected modalities of criteria are given in child nodes. In terminal nodes are given node number, dominant class of cropping system, histograms representing frequency of each cropping system within the terminal node. TN= Terminal node, CS = cropping system



Model relative error: 0.72

Cropping system type	Cropping system subtype		Prediction success (%)	Cases
Low-medium N & cob sales	1.1	No burning, hoeing & herbicide use	42	43
	1.2	Burning after manual slash & clear	40	106
Manual slash, burn & mechanized plowing	2.1	Manual weeding & high N intensity	13	75
	2.2	Low to medium N intensity	18	179
Non-burned & herbicide use	3.1	Mechanized & medium N intensity	63	153
	3.2	High N intensity & sales of grains	59	86

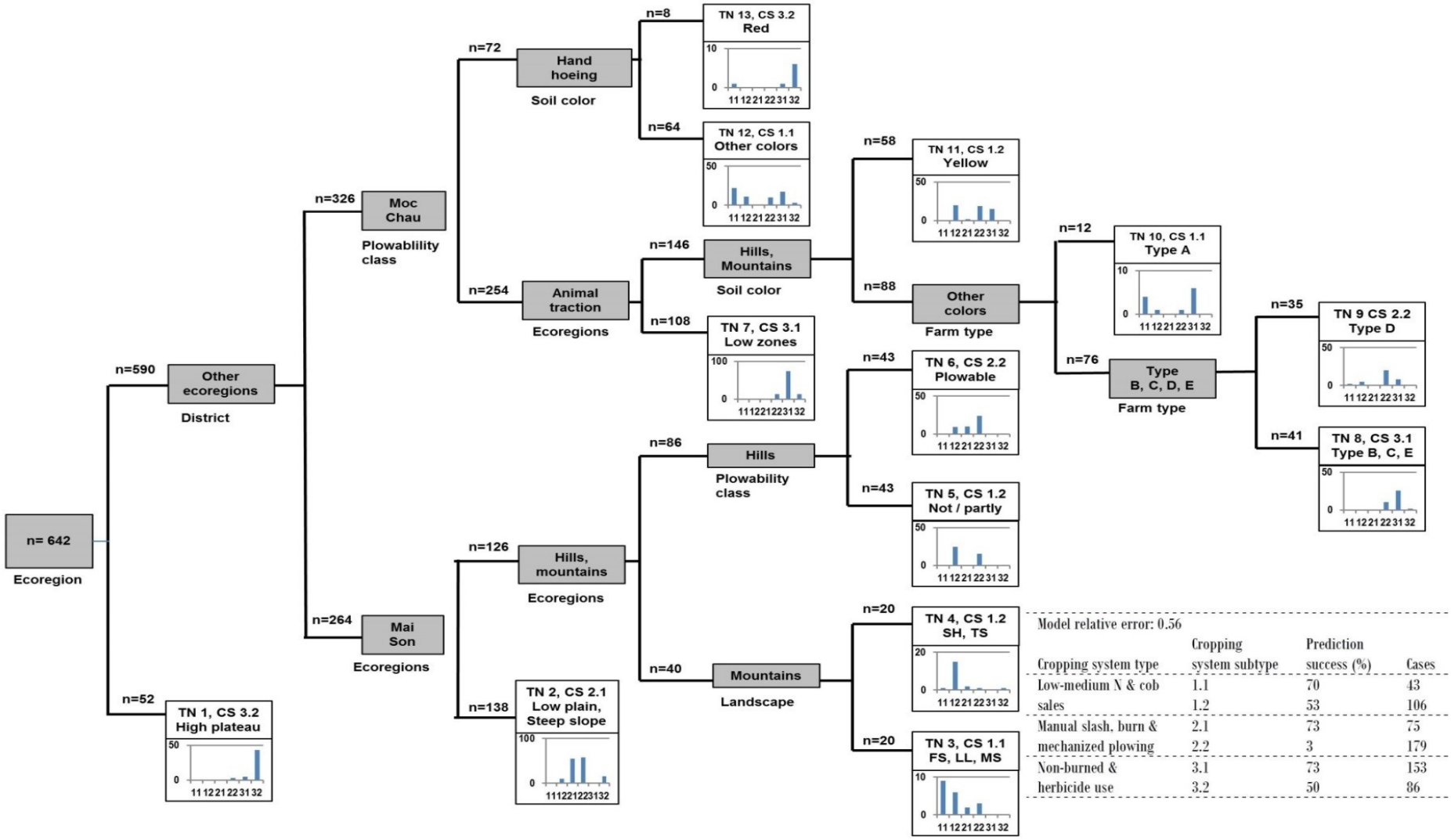
Figure III-4c. Classification tree model 3 describing cropping systems as a function of field biophysical conditions. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. TN= Terminal node, CS = cropping system. Position within the landscape: LL= lowland, FS = foot slope, SH = sloping hill, MS = mountainous slope; TS = top slope.



Model relative error: 0.72

Cropping system type	Cropping system subtype	Prediction success (%)	Cases
Low-medium N & cob sales	1.1	58	43
	1.2	25	106
Manual slash, burn & mechanized plowing	2.1	59	75
	2.2	7	179
Non-burned & herbicide use	3.1	65	153
	3.2	27	86

Figure III-4d. Classification tree model 4 describing cropping systems as a function of factors related to site, farm, farmer and field biophysical conditions. Grey boxes are splitting nodes and white ones terminal nodes. Splitting criteria is given before each node and selected modalities of criteria are given in child nodes. In terminal nodes are given node number, dominant class of cropping system, histograms representing frequency of each cropping system within the terminal node. TN= Terminal node, CS = cropping system. Position within the landscape: LL= Lowland, FS = foot slope, SH = sloping hill, MS = mountainous slope; TS = Top slope.



Model relative error: 0.56

Cropping system type	Cropping system subtype	Prediction success (%)	Cases
Low-medium N & cob sales	1.1	70	43
	1.2	53	106
Manual slash, burn & mechanized plowing	2.1	73	75
	2.2	3	179
Non-burned & herbicide use	3.1	73	153
	3.2	50	86

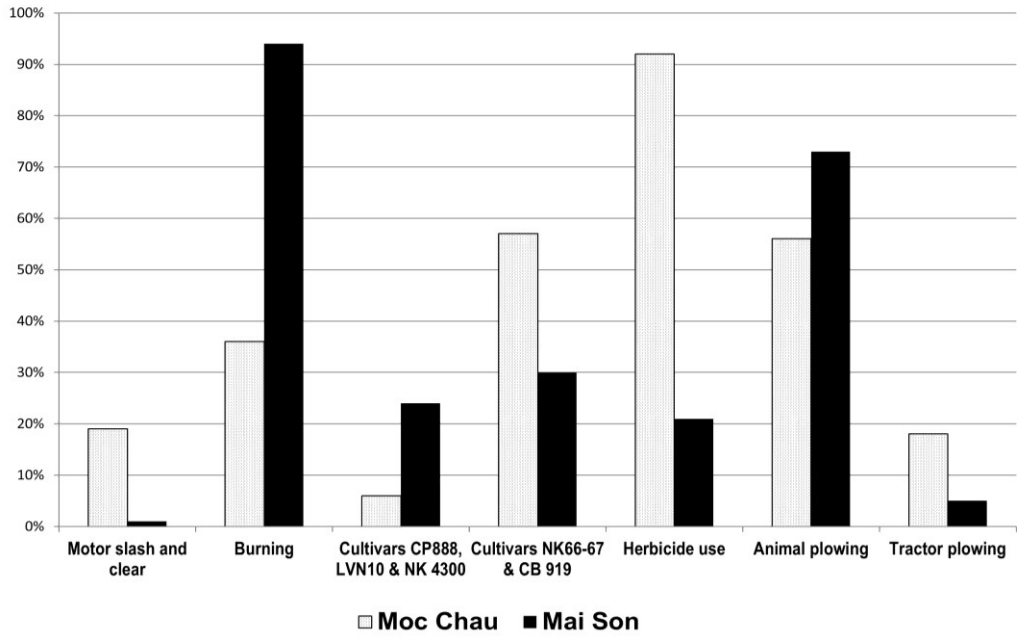
It was associated to fields where animal plowing is at least partly feasible, on yellow-red soil if located far from home, otherwise with above-average fertility (Model 3). In hilly and mountainous ecoregions of Moc Chau, it was specifically implemented by farmers of type B, C or E on fields having non-yellow color (model 4)

Subtype 3.2. (high N intensity with maize sales in form of grains) was mainly practiced on high elevation plateau in Moc Chau district (Model 1), on red soil fields (Model 4) by Kinh farmers (model 2B) whose farm asset value was lower than 3000 US$ and annual investment in farming higher than 1900 US$ (model 2A).

None of the tested models revealed drivers for subtype 2.2, leading us to investigate further cropping system differentiation by examining the following splitting node in the combined MCA / HCA analysis. We subsequently discriminated between two sub-subtypes of system 2.2 (Figures III-3a, III-3b and Table III-6). The first one (2.2.1) was characterized by manual weeding and medium N intensity. It was borderline with subtype 2.1 for axis F1 and F2 considering a continuous range of cropping systems but not for axis F2 and F3. The second one (2.2.2) was dominated by chemical weeding at low to medium N intensity. None of our previous models could explain system 2.2.2. System 2.2.1 was determined by model 4 only (0.55 model error and 51% prediction success) and associated to at least partly plowable fields located in Mai Son. Targeting to explain these two subtypes irrespective of the other ones, we found that combination of elevation, plowability, soil color and fertility resulted in a 51% prediction success for both sub-subtypes, therefore associated to at least partly plowable fields. Cropping system 2.2.1 was more specifically associated to villages above 700 m asl, non-yellow-red soils and fields with below-average fertility. Cropping system 2.2.2 was associated to fields with above-average fertility, on yellow soils for villages located between 700 and 1000 m and on any kind of soil elsewhere.

In the combined classification model (model 4), territory-specific variables (ecoregion and district) remained the primary splitting criteria, followed by plot biophysical characteristics then farm types. It confirmed that territory-related factors were of greater importance to drive cropping systems than plot biophysical conditions and farm/farmer characteristics. We therefore observed maize cultivation practices whose frequency significantly differed among districts (Figure III-5).

Figure III-5. Maize cultivation practices whose frequency significantly differed among districts (z test, p=0.01) within our sample of maize fields surveyed (Mai Son: n=275; Moc Chau: n=395).



We also observed a high diversity of cropping system within farm types (Table III-B).

Table III-B. Frequency of cropping systems types and management practices within farm types

Farm type	Cropping system type (%)							
	11	12	21	22	Of Which		31	32
					221	222		
A	12	34	13	28	15	13	10	3
B	21	25	4	24	9	14	12	14
C	3	16	8	31	13	18	38	3
D	3	7	4	25	4	21	33	27
E	5	10	20	42	28	14	10	12

Considering that farm type appeared last in the classification tree, we concluded that plot biophysical conditions were prevailing determinants of cropping system diversity over farm / farmer characteristics as formerly defined.

3.5. Sustainability performances of cropping systems

3.5.1. Correlations and tradeoffs between productivity, profitability and pressure on the environment

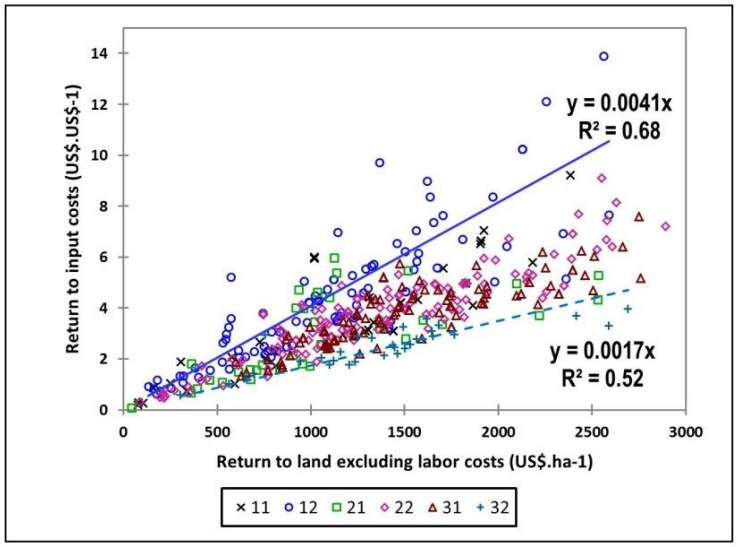
Return to input costs was positively correlated (Figures III-6a & III-6b) with return to land (r^2=0.58) and return to labor (r^2=0.28), indicating that farmers do not face trade-offs between indicators of economic profitability. Return to input cost for cropping system at lowest intensification level (i.e. cropping system 1.2) increased faster with returns to land (Figure III-6a) and return to labor (Figure III-6b) compared to systems at highest intensification level (i.e. subtype 3.2). In all cases, return to labor was not always higher than the daily wage paid to agricultural workers (Figure III-6b).

Return to input cost was positively correlated with yields (r^2=0.43) and N fertilizer agronomic efficiency (r^2=0.32), indicating that increasing agronomic productivity and economic profitability are compatible goals with the current input-output prices. Return to input costs was negatively correlated (Figures III-7a & III-7b) with N (r^2=0.55) and K_2O (r^2=0.69) balances, and most of cropping systems were mining K resources, suggesting tradeoff between economic profitability and mining of soil fertility.

3.5.2. Common sustainability gaps

We recorded only exceptionally other cropping patterns than maize monocropping over past 5 years (data not shown) and thus agro-environmental diversity at field level was particularly low in all types of maize cropping systems. Mean K_2O balances were all negative throughout our data set, corresponding to K removal in all situations. Mean values of erosion index were higher than 3 in all systems corresponding to the mountainous nature of the environment studied which obviously makes erosion risk common to any cropped situation on sloping land. However, significant differences of erosion index were recorded among cropping systems, indicating situations of relatively higher risk compared to other ones.

Figure III-6. Position of all cropping systems on scatter plots representing return to input costs computed against return to land (left – Fig. III-6a) and return to labor (right – Fig. III-6b). Regression for cropping system 1.2 and 3.2 are represented by plain / dotted lines



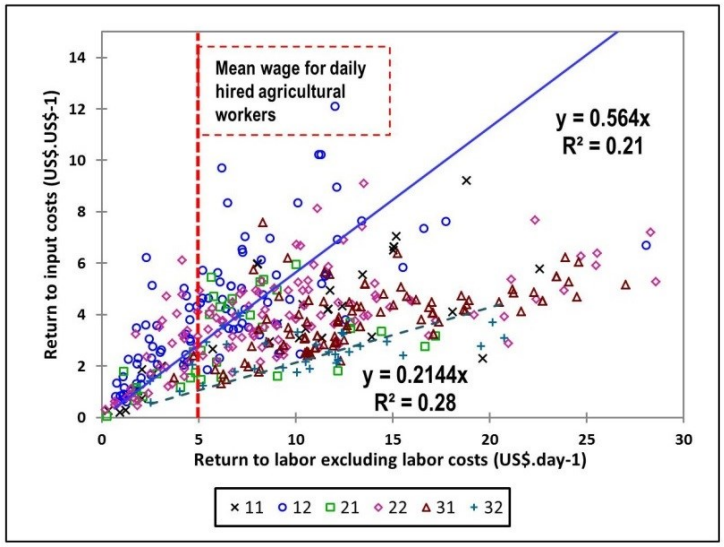
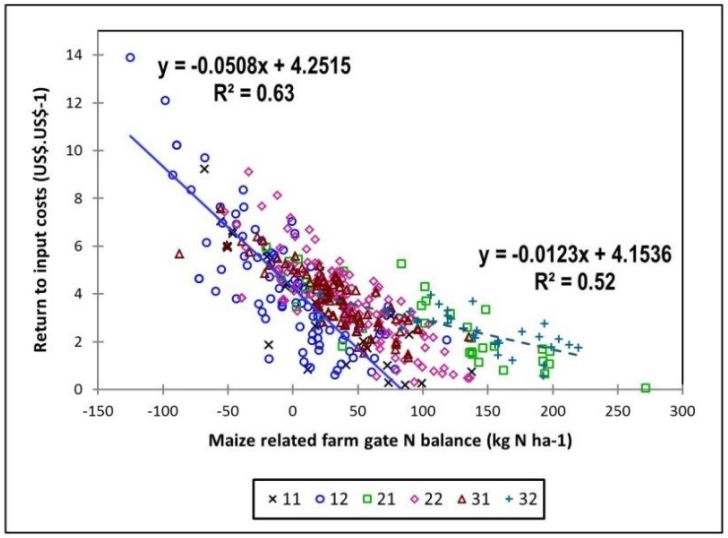
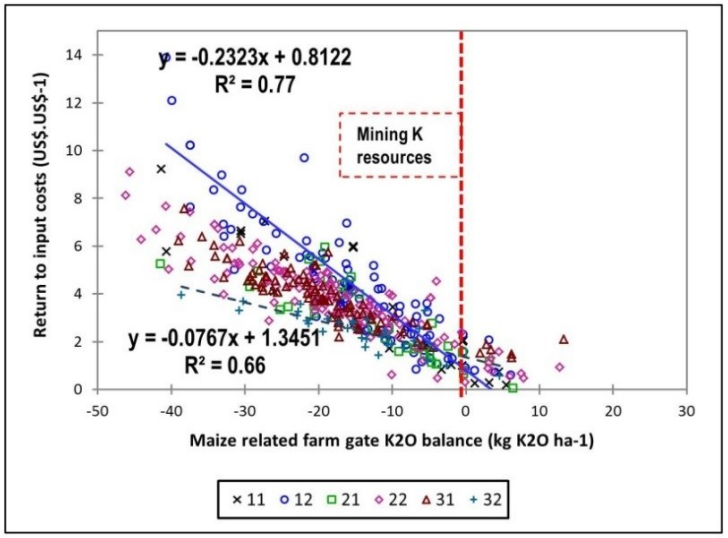


Figure III-7. Position of all cropping systems on scatter plots representing return to input costs computed against maize-related farm gate N balance (left – Fig. III-7a) and K2O balance (right – Fig. III-7b). Regression for cropping system 1.2 and 3.2 are represented by plain / dotted lines





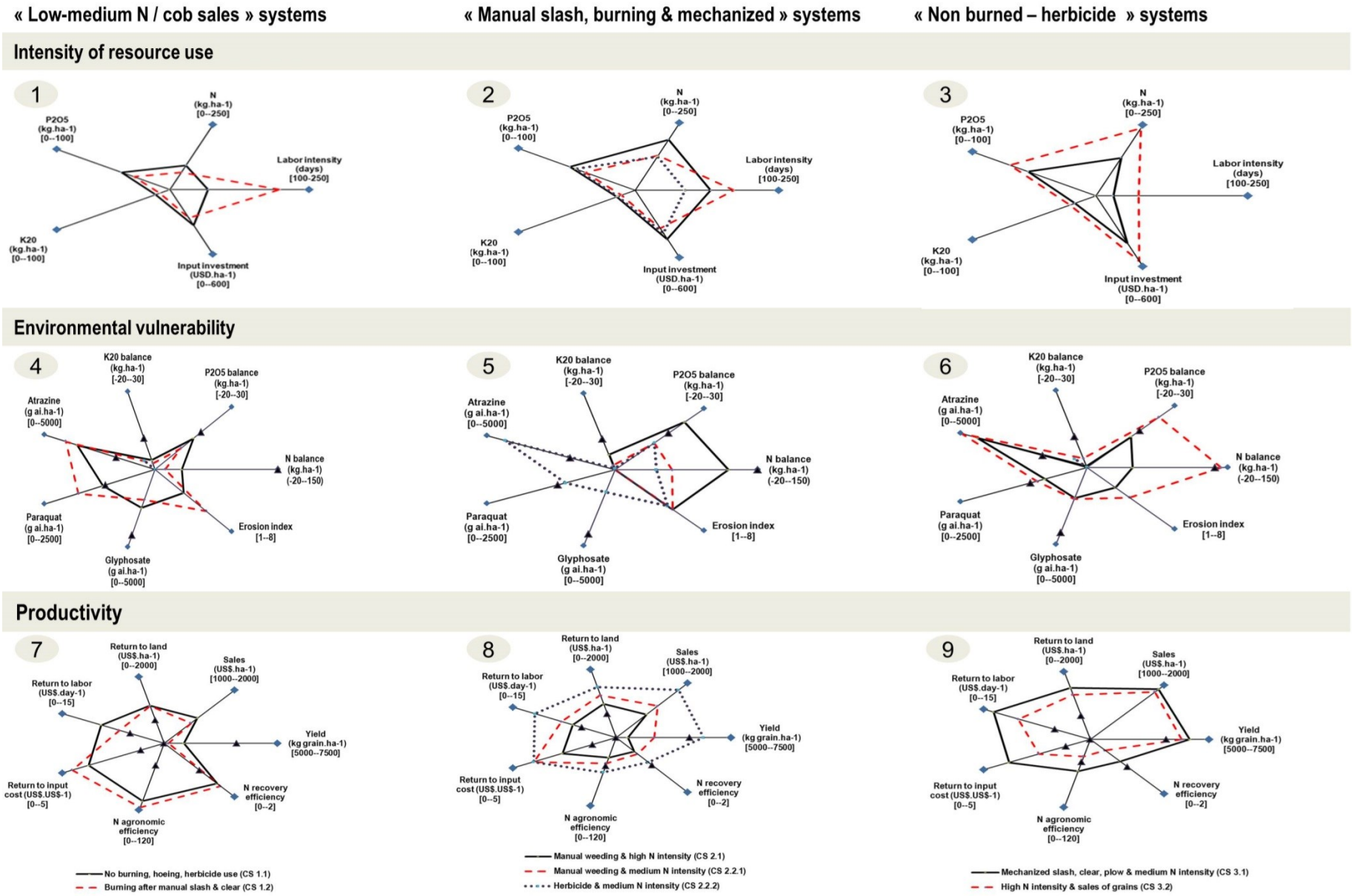
3.5.3. Specific sustainability issues and performance advantages

We identified significant differences in sustainability issues and performances among cropping systems (Figure III-8 & Table III-7).

Table III-7. Main sustainability gaps and advantages of the identified cropping systems

Cropping system type	Productivity				Stability, resilience, reliability			Self-reliance	
	Agronomic productivity		Economic profitability		Agro-environmental vulnerability		Diversity	Agro economic dependency	
	Gap	Advantage	Gap	Advantage	Gap	Advantage	Gap	Gap	Advantage
[1.1]					High dose of atrazine, K removal	Lower erosion index	Very low		Low nutrient use intensity
[1.2.]	Low yields	High N efficiency	low return to land & labor	High return to input costs	High dose of atrazine, N, P, K removals, higher erosion index		Very low	High labor intensity	Low nutrient use intensity, low input investment
[2.1.]	Low yields Low N efficiency		low return to land & labor		High N & P balance K removal, higher erosion index	No risk for herbicide	Very low	High N use intensity	
[2.2.1.]					Higher erosion index, K removal	No risk for herbicide	Very low		
[2.2.2.]		High yields		High return to land & input costs	High dose of atrazine, K removal, higher erosion index		Very low		
[3.1.]	Low N efficiency	High yields		High return to land, labor & input costs	High dose of atrazine & frequency of use, K removal	Lower erosion index	Very low		Low labor intensity
[3.2.]	,	High yields	Low return to input costs		High dose of atrazine application & frequency of use, high N & P balance, K removal, higher erosion index		Very low	High dependency to input High nutrient use intensity	

Figure III-8. Intensity of resource use, environmental vulnerability and productivity of maize cropping systems. Cropping systems of a given type are represented on the same graph. Plain, dashed and dotted lines differentiate cropping system subtypes and sub-subtypes. Axis scales are reported in brackets below each indicator name. Minimum values are located at the center of the graph and maximum values at the opposite position of each axis. Reference threshold values are indicated using a triangle on the corresponding axis.



“Low-medium N - cob sales” systems (type 1) were characterized by below-average yields but highest nitrogen use efficiency (spider graph 7 in Figure III-8) associated to lowest intensity of nutrient use (graph 1). Within this group, subtype 1.1 (no burning, hoeing and herbicide use) yielded low return to land (graph 7) but could be practiced by farmers with only low to intermediate labor intensity and low financial investment for external inputs (graph 1), thus providing intermediate return to input cost (graph 7). It also had low erosion index due to absence of burning (graph 4).
Contrastingly, subtype 1.2 (manual slash, burning and low N intensity) required highest labor intensity among all systems but was practiced at lowest nutrient intensity (graph 1), thus resulting in negative nutrient balances corresponding to nutrient removals (graph 2). It had highest erosion index among all systems (graph 2). It exhibited lowest return to land and labor but had highest return to input cost considering only monetary costs (graph 3), due to lowest level of investment in external inputs (graph 1).

All “manual slash, burning and mechanized” cropping systems (type 2) exhibited high erosion index. Among those systems, subtype 2.1 (manual weeding and high N intensity) did not present better yields than previous systems (graph 8) although it used nutrients at high intensity (graph 2). This corresponded to lowest nitrogen use efficiency (graph 8). This system resulted in lowest return to land, labor and input cost (graph 8). Herbicides were not used in this system, resulting in high labor requirement to control weeds. We assumed that manual weeding was linked to lack of water source easily available and differences in access to herbicides. This system did not put environment at risk for herbicides, but had a highly positive nutrient balance (graph 5). Among subtype 2.2 cropping systems 2.2.1 (manual weeding and medium N intensity) was also characterized by high labor intensity associated to manual weed control but required lower nutrient intensity and investment in external inputs (graph 2) corresponding to better nitrogen use efficiency. It exhibited intermediate yields and economic profitability (graph 8) without putting environment at risk by abusing of herbicide (graph 5). Cropping system 2.2.2 (chemical weeding and low to medium N intensity) required use of herbicides but had among highest indicators of productivity (graph 8) while requiring intermediate intensity of resource uses (graph 2). It exhibited balanced N and P_2O_5 balances (graph 5).

“Non-burned – herbicide” maize cropping systems (type 3) were managed by intermediate to high resource endowment farmers on fields beneficiating from favorable conditions. They exhibited highest yields (graphs 7 to 9) but differed in other assessment indicators. Subtype 3.1 (frequent motorized slash and clear, mechanized plowing and medium N application) corresponded to high level of investment in external inputs (graph 3) with efficient nitrogen use (graph 9), and low labor intensity (graph 3), thus resulting in highest profitability among all systems (graphs 7 to 9). It also had lowest erosion index among all systems (graph 6). Cropping system 3.2 (high N intensity with maize sales in form of grains) used nutrient at higher intensity (graph 3) but did not yield higher than systems 2.2.2 and 3.1, due to the low nitrogen use efficiency. It exhibited the highest N and P_2O_5 nutrient balances among all systems (graph 9). It exhibited low but variable return to labor, intermediate return to land, and lowest return to input cost (graph 9) linked to the highest amount invested for external inputs (graph 3), of which it was the most dependent.

4. Discussion

We identified 5 farm types and 7 maize cropping systems with contrasted management practices and sustainability performances.

We found that economic profitability and agronomic productivity were compatible goals in the region studied. We identified tradeoffs between productivity and the pressure exerted by cropping systems on the environment. We identified the drivers of the region's diversity of maize cropping systems. This confirmed that the diversity of maize cropping systems in the studied region was resulting from multi-scale interactions between territory-related factors, farm/farmers characteristics and field biophysical conditions. Territory-related factors were of prevailing importance over plot biophysical conditions then farm/farmer related characteristics to drive diversity in cropping system and their subsequent performances.
The results suggest that environmental threats exist at field level, that need to be further investigated and monitored:

- Chemical weeding was implemented at similar intensity wherever it was done but frequency of atrazine use was highest in the most productive and profitable systems 3.1 and 3.2.
- Average paraquat application was in line with the maximum recommended dose stated by FAO (1120 g a.i. ha^{-1}), which was also the case for glyphosate, but atrazine was applied at an average rate of 4297 g $ai.ha^{-1}$, i.e. 2,5 times the maximum limit allowed in the USA on highly erodible bare soils (1750 g a.i. ha^{-1}) and roughly 2 times the maximum limit in any situation (2200 g a.i. ha^{-1}) (Ribaudo MO, 1994). Although differences of climates have consequences on ecological risks of pesticides (Daam and Van den Brink, 2010), such applied dose may imply possible contamination of groundwater and streams as it was the case in the European countries, Canada and the USA. This needs to be further studied, especially since concerns about potential environmental effects of atrazine were reported, such as endocrine disruption and chromosomal damage in animals and humans (Vazquez-Amabile et al., 2006);
- in all cropping systems K2O balance was often neatly negative. Cropping system 1.2 was also characterized by an abundance of cases with negative P2O5 and N balances. This suggests that a substantial progress in long term nutrient management can be expected from simple recommendations regarding fertilizer use, based on nutrient balance.
- Although N balance in all systems were below the level (150 kg $N.ha^{-1}$) considered compliant with European standards for nitrate concentration in drinking water (Fangueiro et al., 2008; Nevens et al., 2006), high N-surplus in cropping system 2.1 and 3.2 implies economic losses and higher risks of nutrient losses from erosion and runoff. Mean P-balances in cropping system 2.1 and 3.2 were higher than the targeted phosphate balance (10 kg $P_2O_5.ha^{-1}$) adopted for 2011 in North Ireland to reduce eutrophication (Lord Eunice, 2010).
- The erosion index ranged from 3 to 6, corresponding to risks increasing with the steepness of slopes and with the presence of burning

We also found evidence of sustainability gaps at cropping system and farm levels that need to be considered.

- Sales in forms of cobs in system 1.1 were associated to cash constraints at harvest for under-resourced farmers and necessity to repay short-term loans for access to inputs. It suggested existence of poverty traps corresponding to financial limitations in nutrient use intensity, low yields and economic profitability, aggravated by lower market prices due to financial limitations in storage possibilities and repayment of loan interests, resulting in turns in weak financial rooms to invest and further degradation in the poverty cycle.
- Low yields in system 1.2 resulted from combined low investment in external inputs and cultivation of fields with unfavorable conditions (non-feasible animal traction and/or highest elevation and/or fertility below average).

It was associated to nutrient removal and consequently further resource degradation that may put at risk agronomic productivity in the short-term.

Sustainability analysis at cropping system level requires investigation of appropriate indicators of performances. We selected indicators to be simultaneously 'light' (assessed from farmer's declaration) and of practical use to investigate and further guide the monitoring of sustainability gaps. These indicators were based on 'pressure' rather than on 'process' (van der Werf and Petit, 2002), hence environmental impacts of agriculture cannot be always assessed by using direct measurements especially at large scales of analysis (Bockstaller et al., 2008). Nonetheless, the quality of indicators such as erosion index is limited with regards to its capacity to reveal process and discriminate specific situations at risk in the short-term, thus requiring further in-depth investigation. Following Valentin et al. (2008), and considering that sloping fields under a specific land use (maize monocropping with one cropping season), a given climate and similar absence of soil cover are exposed to erosion as long as they are not landscaped (terraces) or cultivated with soil protection measures (vegetative barriers, conservation agriculture), it can however be pointed out that the studied diversity of maize cropping system was logically unlikely to result in highly contrasted erosion risks. Van der Werf and Petit (2002) distinguished between agro-ecological indicators that reflect the impact of one production practice on all environmental components and indicators of environmental impact that reflect the impact of all production practices concerned on one environmental component. When a given performance at cropping system scale (e.g. herbicide risk profile) is linked to a unique practice (e.g; chemical weeding), it is possible to determine which particular practice is responsible for a sustainability gap. Conversely, our method did not allow identifying what were the related weights and impact of each practice in complex performances such as yield. In this case further analysis would be required to determine which interacting combinations of practices account for those gaps. Further research is needed to couple this methodological framework with model-based indicators as well as measured indicators (Bockstaller et al., 2008) and to determine maximum, feasible and optimal threshold ranges for those indicators (Nevens et al., 2006).

Our findings also suggested trade-offs among sustainability criteria and leeways for cropping systems improvement that need to be further investigated. These trade-offs were related to management practices: chemical weeding was for instance identified competing with manual weed control depending on distance and hardness of water supply for spraying. Financial investment for external inputs was competing with hiring of external labor-force. These tradeoffs also concerned sustainability objectives at cropping system level. Reducing environmental risk from herbicide application would imply to increase labor intensity. Increasing return to input cost would imply to decrease financial investment without guaranteeing better efficiency in resource uses. Addressing nutrient removal would require higher investment in inputs and decrease economic profitability in the short-term.

These results are supporting the effectiveness of our methodological framework based on combined classification tools, for identifying the drivers of cropping system diversity and unsustainability. The three core steps of this framework were: (i) Design of contextual cropping system typology based on combination of farmers' practices, (ii) Exploration of interactions between cropping system types and territory-, farm/farmer- and field-related factors of variability, (iii) Sustainability analysis at cropping system scale.

This methodological framework is unique in that:
- it considered the diversity of cropping systems as the dependent variable of multi-scale interactions between environmental and socio-economic conditions rather than considering system performances to be the dependent variable
- it investigated a relatively large list of hypothesized drivers of the diversity of cropping systems with the aim to identify their relative importance in driving diversity, rather than including few determinants as an *a priori* basis for discrimination;
- it aimed at linking the diversity and subsequent performances of cropping systems to management of particular field conditions by stakeholders with diverse resource endowments, rooms for manoeuvre, constraints and strategies, living on particular territories, thus resulting in specific typologies with regards to the context.
- It considered the performances of cropping systems as so strongly correlated with their diversity that they can be analyzed only once the drivers of cropping system diversity have been unraveled
- it based the performance analysis on the management sequence considered as a whole rather than seeking to investigate performances of cropping systems as the dependent variable of interactions between independent cultivation practices and environmental factors.

We found only few examples in which multivariate methods have been used to differentiate coherent sequences of management practices, those practices being considered as the main research object and not reduced to explanatory variables within a performance analysis. Ribbens et al. (2008) investigated biosecurity practices along 609 Belgian pig herds but did not look into farm/farmer and territory related determinants of those practices. Costard et al. (2009) studied 709 pig farms in Madagascar with the aim to differentiate swine farm management and biosecurity practices in smallholder farming communities. They resulted in farm clusters based on site and practices but neither considered those practices as a whole nor used predefined farm types based on differences in access to means of production. With the aim to identify the constraints encountered by farmers with regard to reduction of pesticide use, Le Bellec et al. (2011) used deviation from a “desired” reference management system from a sample of 41 citrus producers to categorize logical sequence of crop management techniques assessed by expert-based binary rules and decision trees. Girard et al. (2008) used repertory grids from a sample of 33 farms to categorize the diversity of land-use practices within long-term strategies with the aim to identify which ones may develop into more sustainable management of shrub encroachment, but did not look into biophysical and farm/farmer related drivers of those practices. Maton et al. (2005) investigated from a 56-farmers survey the relationships between maize irrigation strategies and three farming sub-systems through multivariate analysis including CART regression trees. None of those studies however investigated the relative importance of cropping system drivers even when these determinants were partially integrated to typologies.

There are several advantages in using combination of classification methods to investigate cropping systems. First of all, only the use of quantitative data, statistics and models guarantees that the same method, when applied to the same data, will always yield the same results, irrespective of when and by whom the data are processed (Kostrowicki, 1977). Second, it allows reducing significantly the number of variables to be considered (i.e. dimensionality of the problem) when investigating determinants of cropping systems’ diversity within regions presenting highly diverse biophysical conditions, such as mountainous areas.

Third, investigating the drivers of cropping system diversity through subsequent classification and regression tree analysis allows cross-validating the typology of cropping systems obtained from multivariate analysis applied to variables reflecting only management decision sequence. Last, the method is primarily based on farmers' practices which can be properly characterized without difficulty by classical farm surveys, making it easily applicable to other contexts.
However, applying such a method requires samples of significant size especially to reduce risks of confounding effects between classification factors, which may imply substantial costs in collecting required data. In addition, basing assessment of system performances from farmer declaration only may induce bias under contexts of mountainous familial agriculture of developing countries, due to specificities of biophysical conditions (e.g. slopes) and socioeconomic context (few cadastral maps available, few ownership titles distributed on sloping lands, surface assessed from sowing quantity of grains) .
We compared our methodological framework which involves extracted typologies from multivariate analysis and classification methods (Girard et al., 2008; Köbrich et al., 2003; Le Bellec et al., 2011; Maton et al., 2005) to other common alternative approaches to categorize cropping system including territorial typologies mobilizing multi-agent approaches (Robinson et al., 2007; Valbuena et al., 2008), expert-knowledge based typologies of cropping systems focusing on their functioning and including trajectory approaches (Dore et al., 2008; Dore et al., 1997; Landais, 1998; Perrot and Landais, 1993), and anthropological based analysis of farmers practices (Chauveau, 1995; de Sardan, 1995; Long, 1990; Long and Ploeg, 2008) (Table III-8).

We considered our method based on combined classifications as particularly adapted to exploratory stage of agrarian diagnosis, in situations of knowledge gaps related to the relative importance of drivers to be taken into account in categorizing diversity of cropping systems and their performances. In such situation, one goal is therefore to reduce the dimensionality of the question i.e the number of drivers to be included in the analysis.

In-depth qualitative survey to refine identified types in this exploratory stage would complement such typology in a further stage. Repeating typologies over time would also be essential to provide a dynamic dimension of diagnosis (Kostrowicki, 1977; Landais, 1998) especially since in the present demographic, socio-economic and regulative conditions, farm characteristics are changing rapidly with the result that typologies soon become obsolete (Landais, 1998). Repeating typologies shall be done by considering new hypothesized drivers with regards to context changes as well as refined hypothesized drivers from results of our baseline survey.

Typologies are a necessary tool for comprehensive environmental assessments at regional level (Girard et al., 2008). The purpose of an agricultural typology, however, is not only to capture heterogeneity and obtain better understanding but to make it instrumental in changing reality through modeling the spatial organization of agriculture and planning agricultural development (Kostrowicki, 1977). Classifications are therefore useful to tailor recommendations with regards to technological innovations as well as policy measures to increase the sustainability of the system (Costard et al., 2009).

Table III-8. A comparison of different typological methods aiming at investigating diversity of land use / cropping systems

	Goals	Main methodological tools	System & period sampling / representativity	Analysis of determinants of farmers' practices	Biases and limitations	Reproducibility / capacity for updating	Operational implications	Cost / time / participatory	References
Territorial typologies including multi-agent systems	Spatial and dynamic representation of land use distribution, impact assessment	Spatial and dynamic mapping, multi-agent approach,	All fields – farms - actors within a region / dynamic / representative	None	Does not account for slight changes in management practices / system	High / high	Weak	Weak / weak / weak	Robinson, 2007 Valbuena et al., 2008
Extracted typologies from multivariate analysis and classification methods	Preliminary reduction of cropping system variability for further operational use (sampling, prototyping, yield gap, modeling)	Multivariate analysis and classification tools	x100 - x1000 / short periods / representative	Restricted to quantifiable drivers	Sampling bias. Threshold values to discriminate types. Interrelationship between types. Exclusion of non-representative outliers.	High / high	Intermediate	High / weak / weak	Köbrich, 2003 Le Bellec, 2011 Girard, 2008 Maton., 2005
Of which our method	*Preliminary reduction of cropping system variability with the aim to identify sustainability gaps*	*Idem + statistical analysis*	*Idem*	*Idem*	*Idem + Necessity to base analysis on samples with significant size. Data bias induced by collection from farmer declaration only*	*Idem*	*Idem*	*Idem*	Hauswirth & al., 2013
Expert-knowledge based typologies of cropping systems	Explanatory analysis of system functioning and performances	Case-study, analysis of trajectories, expert-knowledge	x 40 x 60 flexible explanatory case studies / Exemplative / Recent trajectories	Intermediate with focus on agrarian drivers of system functioning	Expert-dependent point of view based on former mental representation of cropping system.	Weak / high	High	High / weak / high	Landais, 1998 Perrot, 1993 Doré, 1997, 2008
Anthropological based analysis of farmers practices	In-depth investigation of links between practices, stakes, actor-oriented logical, constraints, strategies conflicts, cultural and other determinants than those considered for agricultural systems	Analytical clarification of emic / etic categorization In-depth examination of context, participant observation, cross-cultural observation	X 10 / exemplative / long-term case studies focusing on diversity of cases within small-scale territories / communities.	High with focus on cultural and historical drivers, personal trajectories & actors' strategies	Interpretation biases Non-representative	Weak / weak	Not necessarily considered to be an expected output	Weak / high / high	Chauveau,1995 Long, 1990 Olivier de Sardan, 1995

5. Conclusion

The methodological framework developed and tested within this study succeeded in capturing cropping system diversity and preliminary informed on sustainability gaps at cropping system scale. Further research is needed to represent spatial and dynamic dimensions of identified cropping systems as well as to redesign cropping systems with regards to system-specific sustainability improvement. Nevertheless we propose further use of such a framework which is particularly well suited at earliest stage of diagnosis in contexts of high diversity at a regional scale. Understanding determinants of diversity in farmers' practices and subsequent performances of cropping systems associated to variations in biophysical conditions is therefore crucial for those seeking to reduce dimensionality of diagnosis i.e the number of factors determining diversity of cropping systems and their performances. The resulting classifications have numerous possible operational applications. It allows sampling representative sites and systems under contexts of high biophysical and socioeconomic variability. It provides valuable inputs to scientists and practitioners engaged in the redesign of agricultural systems, especially evidence of key sustainability goals that should be reached by innovation when targeting transition from a given cropping system. It determines reference farmers' practices which are a prerequisite for experimental and analysis purpose (regional agrarian diagnosis, modeling, yield gap analysis, field trials, prototyping) as well as for policy-making. In our case study we found that territory-related factors were of prevailing importance over plot biophysical conditions and farm/farmer related characteristics to drive diversity in cropping systems and subsequent performance gaps. This implies that factors of agricultural unsustainability were local and diverse. It also implies that going over sustainability gaps would require local policies addressing diversity of situations instead of strong regional planification promoting norms and standards on an unspecific basis.

6. Acknowledgements

This research was funded by the French Agency for Development within the scope of the ADAM project and the RIME Research Program 3. We are grateful with farmers and authorities of Son La Province for their time and willingness to answer our questions.

Chapitre IV. Land conversion to Conservation Agriculture in tropical mountainous areas: assessing from demonstration sites short-term impact on productivity and profitability at field scale

Land conversion to Conservation Agriculture in highlands of Vietnam: assessing from demonstration sites short-term impact on productivity and profitability at field scale

Damien Hauswirth[1], Pham Thi Sen[2], Damien Jourdain[3], François Affholder[4], Jacques Wery[5], Pablo Tittonell [4,6]

[1] CIRAD, UPR SIA, F-34398 Montpellier Cedex 5, France
[2] NOMAFSI, Phu Ho Commune, Phu Tho District, Phu Tho Province, Vietnam
[3] CIRAD, UMR G-EAU, F-34 398 Montpellier cedex 5, France
[4] CIRAD, UPR SCA, F-34 398 Montpellier cedex 5, France
[5] SUPAGRO, UMR SYSTEM, 2 place Viala, Montpellier, France
[6] Wageningen University and Research Center P.O Box 563 67000 AN Wageningen, The Netherlands

Corresponding author
damien.hauswirth@cirad.fr

Keywords
No-tillage, slopes, rotations, multi-criteria analysis, cover plants

Abstract
In northern highlands of Vietnam, conservation agriculture (CA) is viewed a solution to revert land degradation occuring on sloping lands under tilled maize monocropping. However, constraints applying to smallholder farmers requires identification of situations such that CA increases agronomic performances sufficiently rapidly to ensure equivalent to higher profitability than conventional farming.
Within such context, we assumed that CA can be more productive and profitable than conventional farming in two years. We tested this hypothesis from data recorded at three on-farm demonstration sites. We compared the performances of CA and conventional farming for four rotational options at two fertilisation levels: maize monocropping, rotation between maize and rainfed rice, peanuts or cassava. We based our analysis on eight field-scale indicators: maize yields, N recovery efficiency, rainfall use efficiency, labour use, production costs, returns to land, labour and production costs. We also tested the representativeness of performances recorded at demonstration sites by comparing them to 50 neighbouring farmer fields per site.
The second year after conversion, CA increased maize yields by 0.8 to 1.1 t.ha-1, N recovery efficiency by 25% and rainfall use efficiency by 27% to 34%. Those higher agronomic performances were not sufficient to ensure better economic profitability than conventional agriculture over two years, due to an increase in production costs by 9% to 19%. Higher production costs may deter cash-constrained farmers from spontaneously adopting CA. Making CA worth for farmers within two years thus requires considering incentives, stepwise conversion and valorisation of cover plants. Conventional farming exhibited similar performances at demonstration sites and neighbouring farmer fields. We therefore believe that data from such demonstration can be incorporated into bio-economic farm models to investigate CA attractiveness for contrasted farms.

1. Introduction

Expansion of unsustainable cropping systems on fragile agroecosystems such as sloping lands frequently results in a land degradation process characterized by erosion and depletion of soil natural resources. This is the case in densely populated tropical highlands of Asia, where land degradation particularly affects smallholder farmers depending on agriculture for their livelihoods.

Within such contexts, a growing number of rural development projects have engaged active promotion of conservation agriculture (CA) with smallholder farmers. Under the premise of positive impact on agricultural sustainability, project stakeholders usually expect higher and less variable crop yields, as well as better economic attractiveness, resulting from increased crop production and possible use of cover plant as fodder or for other purpose additionally to its use as a soil protecting mulch.

CA is defined by FAO as the crop management practices satisfying to the three following principles (a) continuous minimum mechanical soil disturbance, (b) permanent organic soil cover, and (c) Diversification of crop species grown in sequences and/or associations.

Impact of CA on crop yields relies on a set of complex factors with differentiated time effects.

In the short term, CA initially reduces N availability due to mulch mineralization (Giller et al., 2009), thus requiring to adjust fertiliser application. This is only after a period that CA will increase nutrient availability. Timing of improved nutrient availability mainly depends on mulch quantity and quality, temperatures, eventual N fixation and possible losses by lixiviation. CA reduces runoff (Schuller et al., 2007; Shipitalo and Edwards, 1998) and erosion (Schuller et al., 2007; Wilson et al., 2008). Short term impact of water balance is reported variable. Mulch reduces soil evaporation (Thierfelder and Wall, 2009) but also holds a small share of rainfall that is evaporated afterwards and cannot be neglected, especially when large amounts of biomass are used as mulches (Scopel et al., 2004). Moreover, depending on the sequence of rainfall and dry periods, the increase in the amount of water infiltrated into the soil may not translate into an increase in crop transpiration but rather into an increase in drainage below root zone. This especially occurs when precipitations, summed over a period preceding the period of occurrence of dry spells, neatly exceed soil water storage capacity, so that an extra infiltrated water does not contribute to an increased reservoir available for the crop facing a dry period (Scopel et al., 2004) Impact on water balance therefore depends on the respective process intensities which can either increase transpiration, with positive effect on yields, or increase drainage losses, offsetting the advantage of water conservation by mulch (Scopel et al., 2004).

CA usually results in increased weed pressure on the short term (Giller et al., 2009) although this depends on seeds contained in mulch, weed infestation status prior to apply mulch as well as amount and timeline of mulch application (Baudron et al., 2012). Short-term impact on pest incidence is reported variable, depending on the respective dynamics of bio-agressors and predators which are both favoured by mulch (Sturz et al., 1997).

CA provides diverse environmental services in the long term, such as enhanced soil fertility (Kumar and Goh, 1999; Nyamangara et al., 2013a; Thierfelder et al., 2013), associated with increased carbon sequestration (Chivenge et al., 2007; Corsi et al., 2012) and cumulated positive impact over time of immediate reduction of runoff and erosion (Derpsch et al., 1986; Schuller et al., 2007; Shipitalo and Edwards, 1998; Wilson et al., 2008).

CA is also reported resulting in better regulation of pests and diseases (Scopel et al., 2013) as well as weeds, in relation with crop rotations (Scopel et al., 2013). This, in turns, is reported resulting in higher and more stable yields under tropical climates, as well as increased economic profitability (Derpsch et al., 2010; Kassam et al., 2009). The time to benefit from higher crop productivity associated with such environmental services may however last for as long as 10 years (Giller et al., 2011; Rusinamhodzi et al., 2011).

While agronomic impacts of CA are largely documented, its economic profitability and short-term acceptability remain largely ignored under the general contexts of smallholder farming in tropical highlands. Among few authors who have considered those aspects, Lienhard et al. (2013) demonstrated in Laos that CA could become more profitable than conventional agriculture in four years. In Vietnam, Affholder et al. (2010) concluded that conventional farming generally stays more attractive than CA when considering the sole year of conversion. Conversion to CA appears particlarly critical for smallholder farmers, due to risks of initial yield losses, especially at low N intensity (Giller et al., 2009; Nyamangara et al., 2013a) which adds-up to the increase of production costs (Affholder et al., 2010; Lienhard et al., 2013)

Smallholder farmers can not be expected to adopt technologies that penalize profitability on the short term, even under the promise of positive effects on the longer term. There is therefore a need for identifying situations and CA options such that positive impact is obtained as early as the second year, counterbalancing possible negative impact on the first year, so that equivalent or higher profitability is obtained when considering the whole two year sequence (still short term).

Within this context, our study aimed at assessing to which extent CA practiced on sloping lands ensure higher economic performances than tilled conventional farming on a reasonably short term of two years.

We assumed that conversion to CA sufficiently improves agronomic productivity and efficiency within two years to ensure higher profitability than conventional systems while maintaining labour use and production costs at an acceptable level.

We tested our hypothesis in highlands of Northern Vietnam, a poor (poverty rate of 29.4% in 2010) and densely populated region (118 inhabitants.km-2 in 2011) where intensive tilled farming on sloping land rises major concerns over land degradation and pollution (Clemens et al., 2010; Valentin et al., 2008; Wezel et al., 2002). In this region, CA is considered a solution to sustain sloping land cultivation of which farmers depend for their livelihoods: only one fifth of the regional area is classified as agricultural land, which about one third of it corresponds to sloping fields.

We based our study on an aggregated analysis of data collected from 2010 to 2012 in three on-farm demonstration sites upon a project intervention, in which a range of CA prototypes on sloping land were demonstrated to smallholder farmers. We assumed that agronomic and economic performances recorded at such sites were comparable to those obtainable by farmers in fields under similar conditions.

2. Materials and methods

2.1. The study region

Demonstration sites were established in Moc Chau and Van Chan districts, where landscape is dominated by steep slopes particularly exposed to land degradation. Soils mainly include neutral to strongly acidic ferralsols and acrisols. Average yearly rainfall reaches 1,600 mm, with a hot rainy season from April to October and a cold dry season from November to March.

The climate does not allow cultivating two crops per year above 800 m a.s.l. The agriculture is based on smallholder farming. Farm size rarely exceeds 2 ha. Mean land labour ratio is lower than 0.7 ha per equivalent full-time household active. In both districts, maize (Zea mays L.) is cultivated for sales to livestock food processing companies. Maize is the foremost crop on slopes up to 80%.
Land preparation for maize cultivation includes mixed slash and clear (by knife, string trimmer, spraying of glyphosate or paraquat), burning, then animal- ploughing and furrowing wherever possible, otherwise hoe-tillage. Fertilisers are applied at sowing and at first maize weeding. Conventional weed control consists in knife-cut and spraying of atrazine or paraquat between rows. Farmers harvest and sell production as early as possible after grain maturity when they are cash-constrained, when the field is far from home (to avoid thefts), or to achieve a second crop within the same year; otherwise they harvest up to three months after grain maturity to benefit from better prices.
Secondary annual crops are cassava (Manihot esculenta C.) and canna (Canna edulis Ker.). Perennial crops (tea, fruit trees) are in a less extent also cultivated on slopes. Irrigated rice occupies less than 5% of total agricultural land. Family orchards and small livestock systems (buffalos, cattle, pigs, and poultry) are common farm activities. Free grazing is commonly practiced during the winter.
Most farm activities are managed by unpaid household familial labour complemented by exchange labour. Rare farmers hire workers or contract with service providers for ploughing, spraying herbicides or harvesting.

2.2. The demonstration sites

The three demonstration sites were located respectively in communes of Chieng Hac (site coordinates: 104°32’60’’E - 20°53’16’’N), Phieng Luong (104°46’01’’E - 20°49’33’’N) and Suoi Giang (104°35’08’’ E - 21°35’48’’ N). They had been setup on clay-loamy farmers’ sloping land previously cultivated under tilled maize monocropping for over five years. Sites were established respectively in 2010 (Suoi Giang and Phieng Luong) and 2011 (Chieng Hac).
The three sites differed by biophysical characteristics, such as elevation or slope steepness, and soil properties (Figure IV-1 & Table IV-1).
The cultivation contexts included double cropping and manual agriculture at Suoi Giang, single cropping and manual agriculture at Phieng Luong, and single cropping with animal traction at Chieng Hac.
Demonstration sites were constituted of plots combining a crop fertilisation level with a management type (CONV = tillage without cover plants; CA = no-till and relay cropping of cover plants), a position along the slope and a two-year prototype of cropping system.
The plots were arranged so that the management type and the fertilisation level were both organized in stripes oriented along the slope, whereas prototypes were cultivated within stripes perpendicular to the main slope direction (Figure IV-2). The sequence of plots was ordered to facilitate visual comparisons between management types. The size of elementary demonstration plot differed among sites: 4 m x 25 m at Suoi Giang (total site: 1.7 ha), 3 m x 30 m at Phieng Luong (3 ha), and 8 m x 30 m at Chieng Hac (2.5 ha).

Figure IV-1 Location and main characteristics of the three demonstration sites in the mountainous Northern Vietnam (2010-2012): Chieng Hac, Phieng Luong, and Suoi Giang.

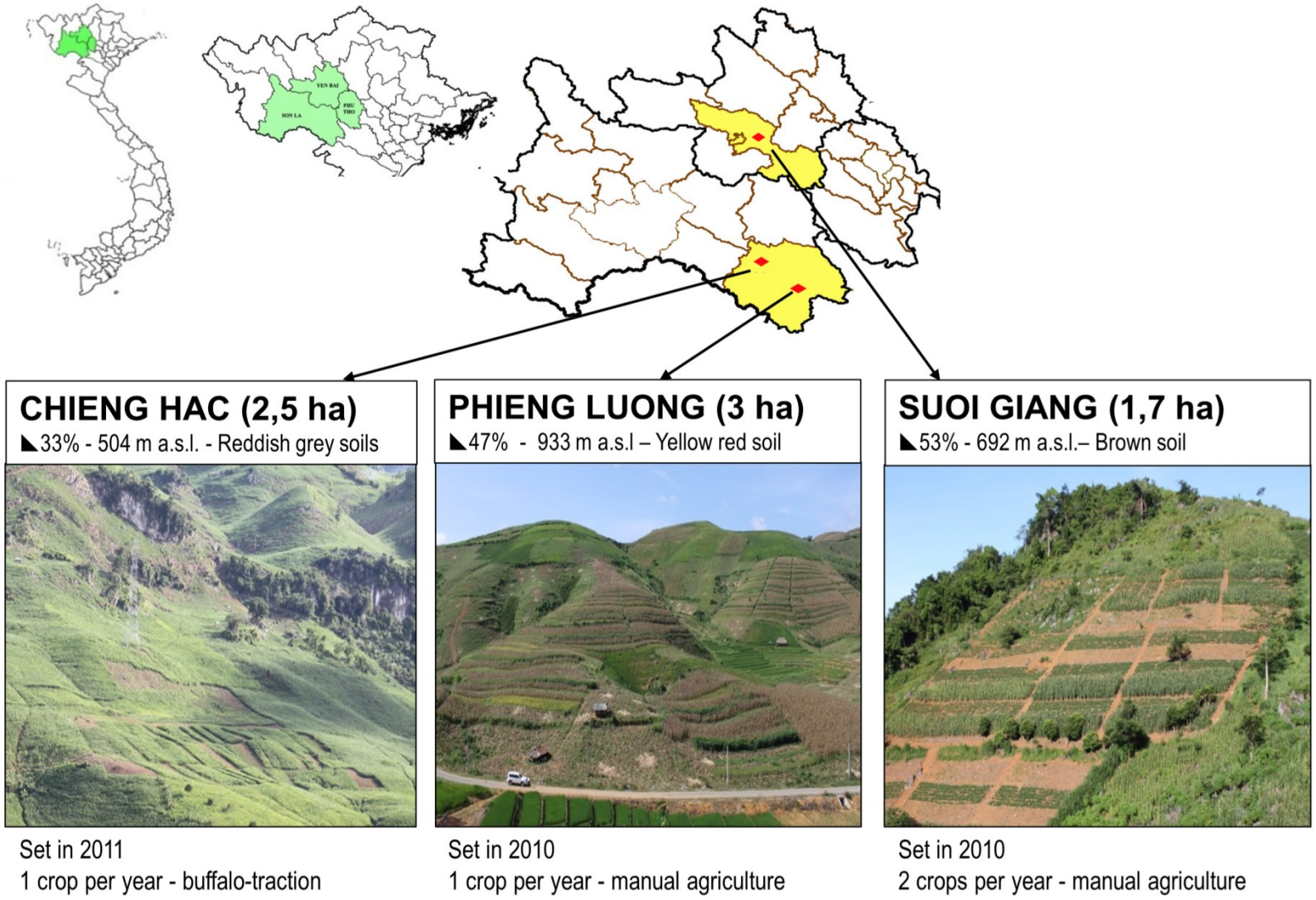
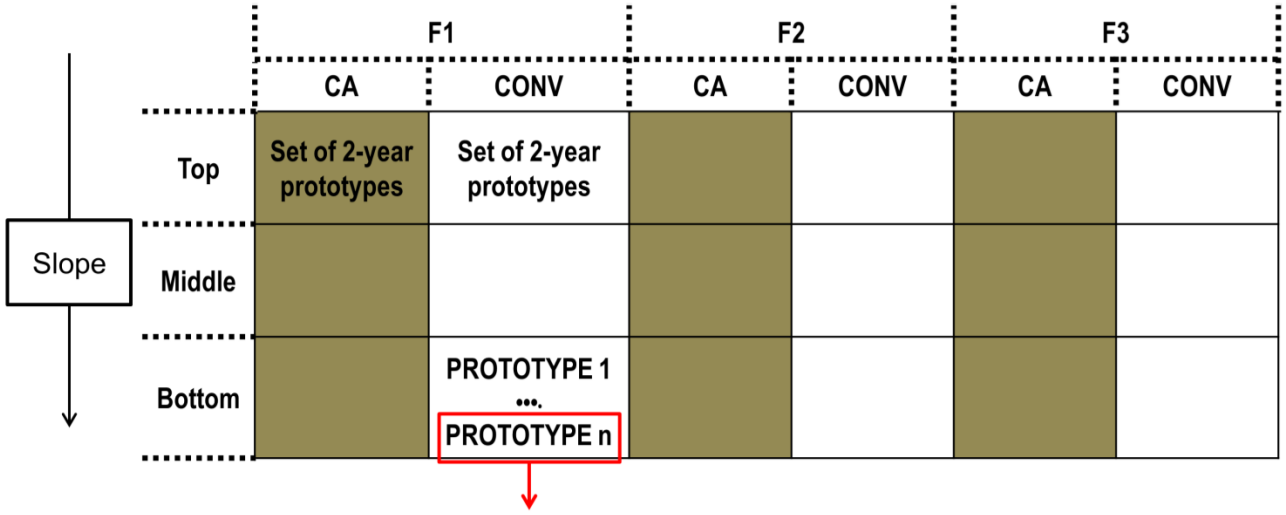


Table IV-1. Mean values of a set of soil parameters recorded at three layer depths (0-10, 10-20 and 20-40 cm) in demonstration sites of Chieng Hac, Phieng Luong and Suoi Giang, prior to implementing demonstration.

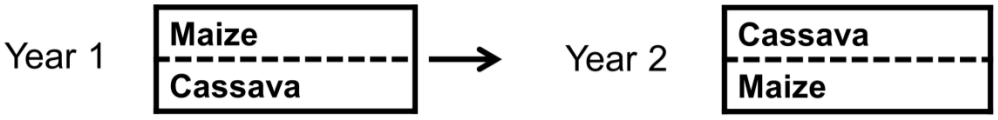
Site	Layer	pH KCl	P Olsen (mg.kg-1)	OC (g.kg-1)	N total (g.kg-1)	CEC (me/100g)
Chieng Hac	*[0-10]*	*4.3*	*162.9*	*29.4*	*1.5*	14.2
	[10-20]	*4.0*	*63.6*	*21.5*	*1.2*	13.8
	[20-40]	*3.9*	*29.6*	*20.9*	*1.1*	14.7
	CV (%)	*13.1*	*92.1*	*34.1*	*17.7*	11.8
Phieng Luong	[0-10]	3.4	56.7	45.8	2.6	15.4
	[10-20]	3.3	39.8	41.7	2.5	14.5
	[20-40]	3.3	27.0	36.4	2.2	13.7
	CV (%)	*7.8*	*17.6*	*18.2*	*12.3*	14.5
Suoi Giang	[0-10]	4.2	26.2	45.8	2.6	14.3
	[10-20]	4.3	16.8	44.1	2.5	13.3
	[20-40]	4.4	14.8	42.1	2.2	12.4
	CV (%)	*4.6*	*50.8*	*10.9*	*8.3*	8.4

Figure IV-2 Typical design of the demonstration sites. CONV : tilled cropping systems without cover plant. CA : No-till cropping systems with cover plant as a relay cropping for commercial crop.



2 annual crop sequences per prototype of cropping systems simultaneously cultivated on twin elementary demonstration plots

Ex: two-year rotation between maize and cassava



The crop fertiliser levels (Table IV-2) were defined by reference to farmers' practices in the district. Only single fertilisers were applied and they were applied by stripes following the main slope direction to reduce lateral transfers of nutrients.
Levels F2 and F3 were demonstrated at all sites whereas level F1 was demonstrated only at Phieng Luong and Suoi Giang

Table IV-2. Fertilization treatments (Chieng Hac, Phieng Luong and Suoi Giang - Mountainous area of Northern Vietnam).

Treatment	Crop	Fertilizer application	Total nutrient (kg.ha^{-1} N-P-K)
F1 (1)	Maize, rainfed rice, peanut, cassava	sowing: 23-0-0	23-0-0
F2	Maize	7 DBS*: 0-15-0 sowing: 23-0-25 25 DAS*: 46-0-0	69-15-25
	Rainfed rice	7 DBS: 0-15-0 sowing: 23-0-25 25 DAS: 23-0-0	46-15-25
	Peanut	7 DBS: 0-15-0 sowing: 23-0-25 30 DAS: 23-0-25	46-15-50
	Cassava	7 DBS: 0-15-0 30 DAS: 23-0-25 60 DAS: 46-0-25	69-15-50
F3(2)	Maize	7 DBS: 0-37-25 sowing: 23-0-25 25 DAS: 46-0-0 40 DAS: 46-0-0	115-37-50
	Rainfed rice	7 DBS: 0-37-25 sowing: 23-0-25 25 DAS: 23-0-0 40 DAS 23-0-0	69-37-50
	Peanut	7 DBS: 0-37-25 sowing: 23-0-25 30 DAS: 23-0-25	46-37-75
	Cassava	7 DBS: 0-37-25 30 DAS: 23-0-25 60 DAS: 46-0-25 90 DAS: 23-0-0	92-37-75

(1): F1 was applied only at Phieng Luong and Suoi Giang

(2): With F3 (all crops), micronutrients were applied once at the first year (5 kg ha^{-1} $CuSO_4$ 24.5%, 10 kg ha^{-1} $MnSO_4$ 25%, 20 kg ha^{-1} $ZnSO_4$ 25%, 10 kg ha^{-1} Bo 15%)

*: DBS, days before sowing; DAS, days after sowing

2.3. The cropping system prototypes

The prototypes of cropping systems were designed upon expert knowledge on local biophysical conditions and cultivation constraints as well as assumptions on possible market opportunities.

The CA prototypes specifically aimed at (i) reducing soil erosion thanks to no-till and mulching, (ii) increasing in the short-term field-scale productivity and profitability; while (iii) ensuring cropping system diversification from cultivation of diverse cover plants and/or commercial crops over a two-year crop sequence. The CA prototypes were cultivated without burning. Mulch was prepared prior to sowing by motorized slashing (complemented by mechanised rolling at Chieng Hac) then spraying of glyphosate and 2,4 D-amin.

Mulch included maize residues and weeds, complemented by residues of cover plants previously weed-killed the second year. The sundried mulch weighted in average 1 t ha-1 and covered 30% of the soil surface the first year. It weighted over 4 t.ha-1 and covered more than 40% of the soil surface the second year. Maize was sown into mulch with a bamboo stick at Phieng Luong and Suoi Giang, and with a single line Fitarelli seeder tracted by a buffalo at Chieng Hac. The cover plants, associated as a relay cropping, were of three types: (1) leguminous species of potential interest for livestock such as stylo [*Stylosanthes guianensis* (Aublet) Sw.] and velvet bean [*Mucuna pruriens* (L.) DC. var. *utilis* (Wall. ex Wight) Baker ex Burck]; (2) edible leguminous crop such as rice bean [*Vigna umbellate* (Thunb.) Ohwi and Ohash]; and (3) forage species such as signal grass (*Brachiaria ruziziensis* R. Germ. and C.M. Evrard). Cover plants were dibbled and never fertilised, as those plants were primarily cultivated for mulching purpose. Weed management along crop growth involved paraquat post-emergence application before sowing of cover plant and manual weeding by knife after that. Atrazine was not sprayed on CA prototypes, as this herbicide was incompatible with the chosen cover plant species.
The CONV prototypes involved land clearance by glyphosate application, knife-cut and string-trimmer then burning of residues. Tillage was implemented as farmers do in neighbouring fields, i.e. by hand-hoeing at Suoi Giang and Phieng Luong; and by buffalo ploughing and furrowing at Chieng Hac. Weed management along crop growth included knife-cut and post-emergence application of paraquat (all crops) and atrazine (maize only).

2.4. Data collection and measurements

2.4.1. Indicators and timeline considered

We selected upon end-user value for farmers and prototype designers a set of eight field-scale indicators of agronomic and economic performances (Table IV-3).

Table IV-3. Indicators used to assess the sustainability performances of cropping system prototypes demonstrated at Chieng Hac, Phieng Luong and Suoi Giang

Sustainability criteria	Indicator	Variable (unit)	Variable measurement and timeline
Agronomic productivity	Crop yields	Maize grain yields (kg ha-1 at 14% moisture)	Each year: grain production recorded on 3 samples of 8m² per elementary demonstration plot and brought to 1 ha
Agronomic efficiency	Nutrient Use Efficiency	Maize N recovery efficiency (ratio)	Ratio calculated each year: kg ha-1 N grain (1) / kg ha-1 applied N
	Water Use efficiency	Maize rainfall use efficiency (kg. grain. mm rainfall -1)	Ratio calculated each year: grain production / mm rainfall between sowing and harvest
Economic profitability	Land efficiency	Cropping system return to land (USD ha-1)	Difference calculated over the two years: local market value of commercial production – production costs
	Labour efficiency	Cropping system return to labour (USD day-1)	Ratio calculated over the two years: return to land / labour intensity
	Cash efficiency	Cropping system return to production costs (ratio)	Ratio calculated over the two years: return to land / production costs
Economic acceptability	Farm resource allocation	Cropping system production costs (USD ha-1)	Over the two years: cost of seeds, pesticides, and fertilizers
		Cropping system labour use (working day ha-1)	Over the two years: number of working days

(1): Using average N content in commercial products reported by Ladha et al. (2005)

The set of indicators was selected to allow an integrated assessment of cropping system performances while being of practical use in guiding further adaptation. The indicators of agronomic productivity and efficiency were assessed from annual maize production each year to investigate the transition process under CA. At Suoi Giang, those indicators were derived from production of both cropping seasons summed within a given year. The indicators of economic profitability and acceptability were assessed from all crops of the two-year sequence considered at a whole.

2.4.2. Agronomic productivity and efficiency

Crop yields were recorded as follows: maize cobs were weighted at field from three samples of 8 m^2 per elementary demonstration plot. One subsample of 10 plants per elementary demonstration plot was taken to determine the cob-to-grain ratio and the moisture percentage. For other crop products (cassava tuber, paddy rice, peanut shells), the fresh production was weighted at field from three samples of 8 m² per elementary demonstration plot. A subsample of one kilogram was taken at each elementary demonstration plot, sundried then weighted again to infer the yield.

N recovery efficiency in maize grains was approximated using a mean value of 14 g N kg.grain ha-1 reported by Ladha et al. (2005). Maize rainfall efficiency was assessed at each site using the daily weather data recorded at the closest State-owned weather station at district level (i.e. 20 km maximum from each site).

2.4.3. Economic profitability and acceptability

Data available at each site included crop selling prices at harvest, prices of inputs recorded on the local market one month prior to the beginning of cropping season (locally available inputs), and prices paid for purchasing it off-site when it was not locally available (e.g. seeds of cover plants and micronutrients). Records also included the amount of work spent for each agricultural activity and each cropping system a given year at a given site.

We defined labour use as the sum over two years of the number of working days spent for a given cropping system. For all the economic calculations, we used the mean conversion rate of 1 US$ = 20 000 Vietnamese Dong (VND).

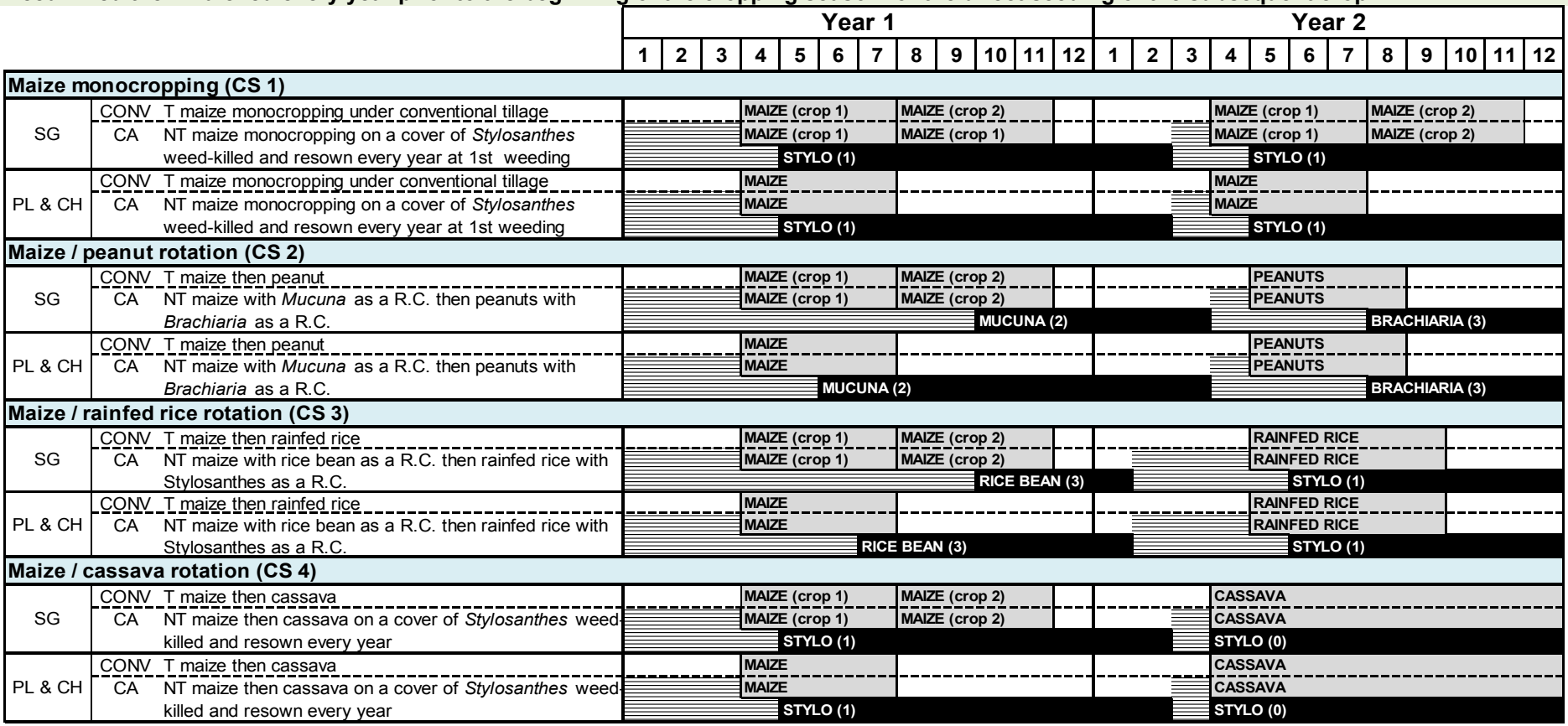
We applied the specific prices obtained for a given production sold right after harvest at a given site the year it was produced. We applied to each input used its purchasing price prior to the starting of the cropping season. Since the whole biomass was used for mulch, no economic value was given to it. We did not take into account the costs of specific equipment to implement direct seeding (such as direct planters or locally-made rollers), assuming that it was equivalent to the cost of equipment for conventional seeding. Since agricultural activities are usually performed by unpaid familial labourforce, we did not consider any costs to hire external labourers.

2.5. Data analysis

We aggregated prototypes of cropping system (Figure IV-3) into four rotational options (CS1 = two year maize succession, CS2 = rotation maize - cassava, CS3 = rotation maize - rainfed rice and CS4= rotation maize - peanut).

We assumed that each site was a replicate of elementary treatments consisting in a particular combination of three factors of which all modalities were implemented at all sites (i) crop fertilisation levels (F2 and F3), (ii) management type (CONV and CA), and (iii) rotational option (CS1 to CS4).

Figure IV-3. Representation over 2 years of four demonstrated CA systems (no-tillage and cover plants as a relay cropping) and their equivalent under conventional agriculture (tillage and no association of cover plants) demonstrated at the three sites. For CA systems, cover plants were weed-killed then mulched every year prior to the beginning of the cropping season for the direct seeding of the subsequent crop.



SG: Suoi Giang PL: Phieng Luong CH: Chieng Hac

NT: No tillage T: Tillage

Main cash crop Cover plant Mulch

(0) associated at sowing of main crop
(1) associated at 1st weeding of main crop
(2) associated at 2nd weeding of 1st crop (CH & PL) or 2nd crop (SG)
(3) associated 1 month prior to harvest of 1st crop (CH & PL) or 2nd crop (SG)

We used a mixed-model ANOVA to identify the main factors explaining variations of agronomic and economic performances and to compare CA to CONV for (i) agronomic performances the first and the second year of demonstration (ii) economic performances summed over two years (thus assuming the absence of positive impact of CA on profitability the first year. In all analysis, fixed effects included fertilisation level, management type and rotational option. We included site as a random factor whereas year of demonstration was included as a fixed effect in analysis of agronomic indicators. We tested the relative contribution of all factors and all first-order interactions between factors to the total variance. We applied paired multiple comparisons (Fisher LSD) to separate groups of treatments with statistically significant differences ($P > 0.05$) in average values of indicators.

2.6. Comparison with farmer fields

We compared the yields, returns to land and returns to production costs recorded at demonstration sites with those obtained by farmers in neighbouring fields. Our aim was to assess if field-scale performances recorded at demonstration sites can be considered representative of farmers' ones. To do so, we inquired 50 farmers' plots per site for the performances obtained the former year, respectively corresponding to the cropping seasons 2011 (Chieng Hac and Phieng Luong) and 2012 (Suoi Giang). We recorded from farmer declaration and on a field-by-field basis (i) the plot biophysical characteristics (such as slope, landscape position, main constraints to production, soil colour and fertility appraisal); (ii) the yields and (iii) the crop management (such as cultivation practices, cropping patterns, intensity of input use, labour allocation, form of sales). We used the prices recorded at neighbouring demonstration site the same year to assess indicators of economic profitability at farmers' fields.

3. Results

3.1. Maize grain yields, N recovery efficiencies and rainfall use efficiencies

In the first year, maize grain yields, N recovery efficiencies and rainfall use efficiencies were equivalent between CONV and CA (F2 and F3) (Table IV-4).

Table IV-4. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and maize rainfall efficiencies (kg maize grain.mm rainfall-1) compared for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA) in the first and second year of demonstration

	Year of demonstration	1st year			2nd year		
Fertiliser level in kg.ha-1.crop-1 (N-P-K)	Management type	Maize yields (t grain.ha-1 at 14% moisture)	Maize N recovery efficiency (kg N in grains.ha-1/kg N applied.ha-1)	Maize rainfall efficiency (kg. maize grain.mm rainfall-1)	Maize yields (t grain.ha-1 at 14% moisture)	Maize N recovery efficiency (kg N in grains.ha-1 per kg N applied.ha-1)	Maize rainfall efficiency (kg grain.mm rainfall-1)
F2 (69–15–25)	CONV	6.5 A	1.1 A	9.6 A	4.8 A	0.7 A	5.4 A
	CA	6.7 A	1.2 A	9.8 A	5.6 B	0.9 B	6.9 B
F3 (115–37–50)	CONV	7.6 α	0.8 α	11.1 α	5.8 α	0.5 α	6.5 α
	CA	8.4 α	0.9 α	12.3 α	7.0 β	0.7 α	8.7 β

At a given fertilisation level, values within a column followed by the same letter are not significantly different for cultivation method (Fisher LSD, $P > 0.05$).

The second year showed a different trend (Table IV-4). CA significantly increased maize grain yields by 16% (F2) and 23% (F3); N recovery efficiencies by 25% (F2); and rainfall use efficiencies by 27% (F2) and 34% (F3).

Maize yields, N recovery efficiencies and rainfall use efficiencies significantly decreased from the first to the second year of demonstration (Table IV-5).

This result was consistent across management types (Table IV-5) and fertilisation levels (Table IV-6). The relative yield decrease between the first and the second year was lower under CA (16%) than under CONV (25%).

Table IV-5. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and maize rainfall efficiencies (kg maize grain.mm rainfall-1) compared between the first and the second year of demonstration at fertilisation levels F2 and F3

Fertiliser level in kg.ha-1.crop-1 (N-P-K)	Year of demonstration	Maize yields (t grain.ha-1 at 14% moisture)	Maize N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1/kg N applied.ha-1)	Maize rainfall efficiency (kg. maize grain.mm rainfall-1)
F2 (69–15–25)	Year 1	6.6 A	1.2 A	9.7 A
	Year 2	5.2 B	0.8 B	6.1 B
F3 (115–37–50)	Year 1	8.0 α	0.9 α	11.7 α
	Year 2	6.4 β	0.6 β	7.6 β

At a given fertilization level, values within a column followed by the same letter are not significantly different for cultivation method (Fisher LSD, $P > 0.05$).

Table IV-6. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and rainfall use efficiency (kg maize grain.mm rainfall-1) compared between the first and the second year of demonstration for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA).

Management type	Year of demonstration	Maize yields (t grain.ha-1 at 14% moisture)	Maize N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1/kg N applied.ha-1)	Maize rainfall efficiency (kg. maize grain.mm rainfall-1)
CONV	Year 1	7.1 a	0.9 a	10.4 a
	Year 2	5.3 b	0.6 b	6.0 b
CA	Year 1	7.6 A	1.1 A	11.0 A
	Year 2	6.3 B	0.8 B	7.8 B

At a given fertilization level, values within a column followed by the same letter are not significantly different for cultivation method (Fisher LSD, $P > 0.05$).

The yield variability associated to differences between sites and rotational options was higher the second year compared with the first one (Figure IV-4): coefficients of variations of maize yields associated with CONV and CA were respectively of 0.30 and 0.25 the first year of demonstration and of 0.38 and 0.35 the second year.

Rotational options had a differentiated impact on agronomic performances (Table IV-7). Cassava depressed yield of subsequent maize both under CA and CONV (Table IV-7). Cassava depressed yield of subsequent crop both under F2 and F3 (not shown)

Figure IV-4. Coefficients of variation for maize yields corresponding to the variability associated with rotational options, slope positions, and sites, compared for CONV and CA at F1 and F2, the first and second year of demonstration implementation.

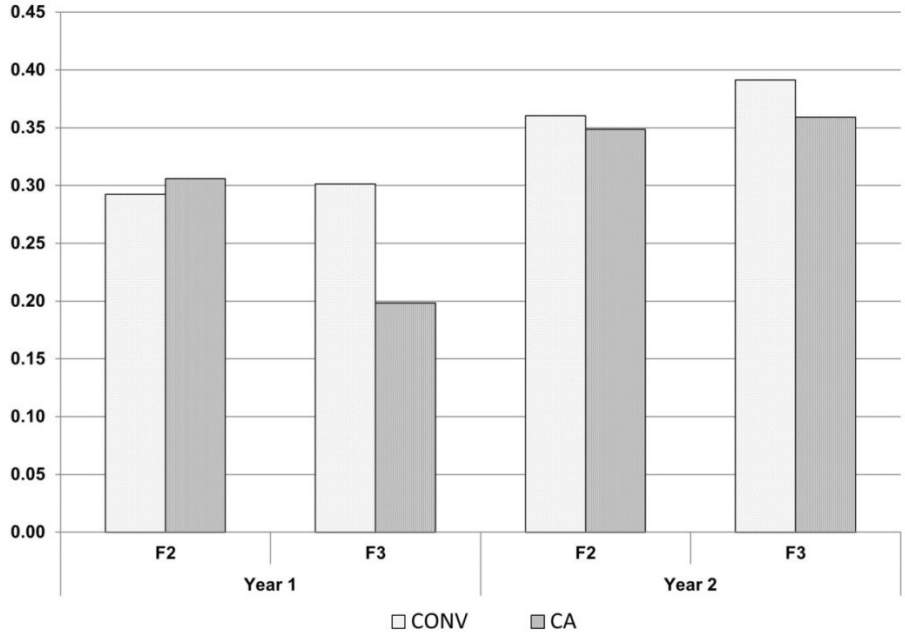


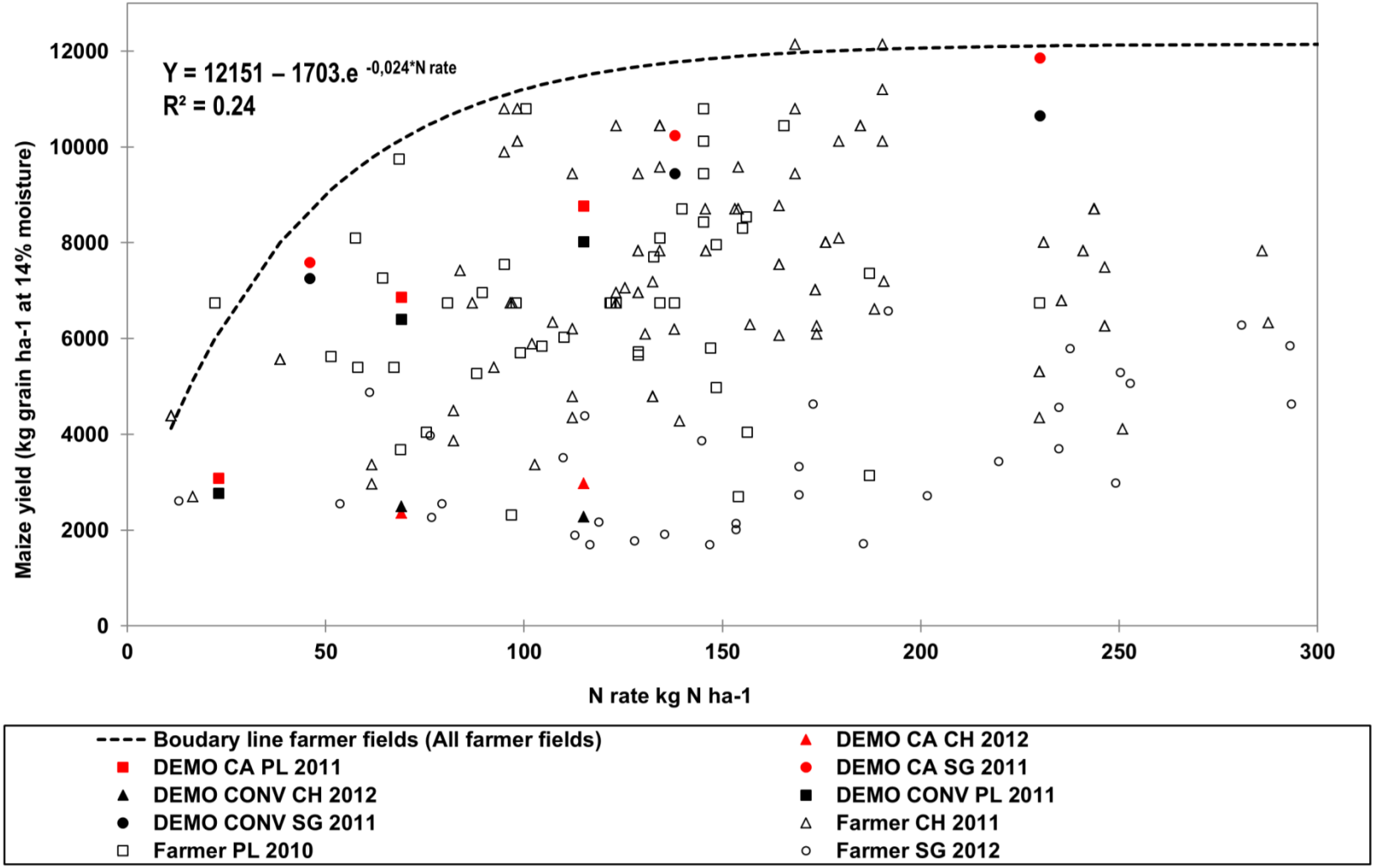
Table IV-7. Maize grain yields (t.ha-1 at 14% moisture), N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1 per kg N applied.ha-1) and rainfall use efficiency (kg maize grain.mm rainfall-1) compared the second year of demonstration between rotational options for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA)

Management type	Rotational option	Maize yields (t grain.ha-1 at 14% moisture)	Maize N recovery efficiency (kg N in maize grains.ha-1/kg N applied.ha-1)	Maize rainfall efficiency (kg. maize grain.mm rainfall-1)
CONV	CS 1 (Maize monocropping)	6.2 a	0.7 a	6.8 a
	CS 2 (Rotation maize – peanut)	5.7 a	0.6 ab	5.5 a
	CS 3 (Rotation maize – rice)	5.6 a	0.7 a	6.8 a
	CS 4 (Rotation maize – cassava)	1.7 b	0.3 b	1.6 b
CA	CS 1 (Maize monocropping)	7.8 A	0.8 A	7.7 AB
	CS 2 (Rotation maize – peanut)	6.5 A	0.9 A	9.4 A
	CS 3 (Rotation maize – rice)	6.3 A	0.8 A	7.5 AB
	CS 4 (Rotation maize – cassava)	4.3 B	0.7 A	6.6 B

At a given fertilization level, values within a column followed by the same letter are not significantly different for rotational option (Fisher LSD, $P > 0.05$

The mean maize yields recorded under CA and CONV the second year of demonstration was plotted together with those obtained by farmers in neighbouring fields (Figure IV-5). This comparison shows that the yield improvement recorded under CA the second year of demonstration is lower than the spatial variability of maize yields farmers are dealing with for a given rate of N fertilisation. The yields recorded at all demonstration sites for both CA and CONV were lower than the boundary curve limiting those in farmers' fields. It can therefore be considered that yields of demonstrated systems are coherent with yields obtained by farmers in their fields. The comparison also shows that yields recorded at Chieng Hac site in 2012 were particularly low compared to those obtained by farmers in 2011. This result relies to a severe drought period which penalized maize yields at Chieng Hac in 2012.

Figure IV-5. Maize grain yields computed against N fertilisation rates compared between demonstrations sites (CA and CONV) and neighbouring farmers fields (CONV). Values for farmer fields refers to cropping seasons 2012 (Suoi Giang) and 2011 (Phieng Luong and Chieng Hac). Values for demonstration sites refers to the second year of demonstration. At Suoi Giang, the plotted values corresponds to the cumul of two crops within one year. CH: Chieng Hac; PL: Phieng Luong; SG: Suoi Giang; CA: Conservation Agriculture; CONV: Conventional Agriculture.



3.2. Economic acceptability and profitability

Labour use over two years was equivalent under CA and CONV (Table IV-8): savings on burning and ploughing under CA were compensated by the extra labour requirement for mulch preparation and cover plant management. Labour use remained higher at Suoi Giang, where two maize crops were cultivated within one year, than at Chieng Hac and Phieng Luong where only single cropping was achieved (Figure IV-6). Furthermore, rotation between maize and cassava required less labour than the others options cultivated at Suoi Giang.

CA increased production costs by 19% at F2 and 9% at F3 compared to CONV, due to (i) additional purchases of seeds for cover plant cultivation and (ii) off-site purchase of 2,4 amin for mulch preparation (Table IV-8).

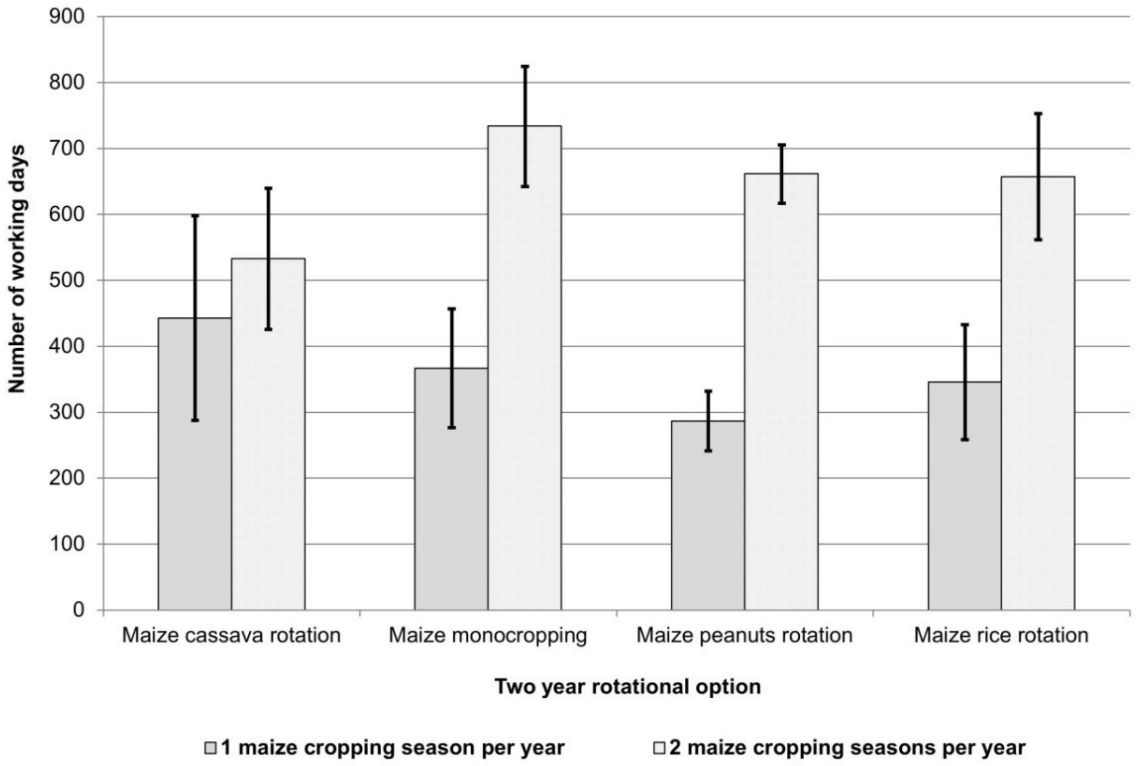
The increase of production costs cancelled the benefit of higher sales under CA. Profitability of CA and CONV over two years were therefore equivalent for a given fertilisation level (Table IV-8).

Table IV-8. Two-year production costs, labour use and returns to land, labour and production costs compared for conventional agriculture (CONV) and conservation agriculture (CA) at two fertilization level

		Acceptability		Economic profitability		
Fertiliser level	Management type	Production cost (USD.ha-1)	Labour use (day.ha-1)	Return to land (USD.ha-1)	Return to labour (USD.day-1)	Return to production cost (USD.USD-1)
F2	CONV	784 A	439 A	1651 A	4.1 A	2.2 A
	CA	931 B	434 A	1678 A	3.7 A	1.9 A
F3	CONV	1515 α	424 α	1206 α	2.6 α	0.9 α
	CA	1645 β	468 α	1386 α	2.9 α	0.9 α

At a given fertilization level, values within a column followed by the same letter are not significantly different for cultivation method (Fisher LSD, $P > 0.05$

Figure IV-6. Labour use over two years (cumulated number of working days) compared between two-year rotation option and number of maize cropping seasons per year



Economic performances of rotational options greatly varied across demonstration sites (Table IV-9). Maize monocropping remained the more profitable option at Chieng Hac (highest returns to land, labour, and production costs) but it required more labour than rotation between maize and rice or peanut and more production costs than rotation between maize and rice. At Phieng Luong, maize monocropping was less profitable than rotation between maize and peanut or rice, but those three options required similar labour use and production costs. At Suoi Giang, maize monocropping exhibited similar profitability than rotation between maize and cassava or rice, but required more labour use and more production costs than rotation between maize and cassava.
Return to land was correlated across demonstration sites with return to labour (r^2=0.84) and with return to production costs (r^2=0.74). Return to land was similarly correlated with return to production costs (r^2=0.75) in neighbouring farmer fields (Figure IV-7). The mean values recorded for those indicators at demonstration sites were coherent with such regression for both CA and CONV management. At Phieng Luong and Suoi Giang, the mean returns to land and production costs at demonstration sites were in the average of values recorded in neighbouring farmers' fields. At Chieng Hac, indicators at demonstration site were low compared with farmers' fields. Similarly to yields, this result relies on drought period which penalized profitability at Chieng Hac in 2012.

4. Discussion

Within the context of our study, CA had differentiated impact on agronomic performances the first and second year of trial. In the first year, yields and agronomic efficiency were equivalent between CA and conventional agriculture. In the second year, CA significantly increased yields and agronomic efficiency. However, improvement of agronomic performances was not sufficient to ensure better economic profitability over two years. Indeed, the increase in production costs associated with conversion to CA cancelled the benefit of higher agronomic performances.

4.1. Conditions for a yield increase from the second year

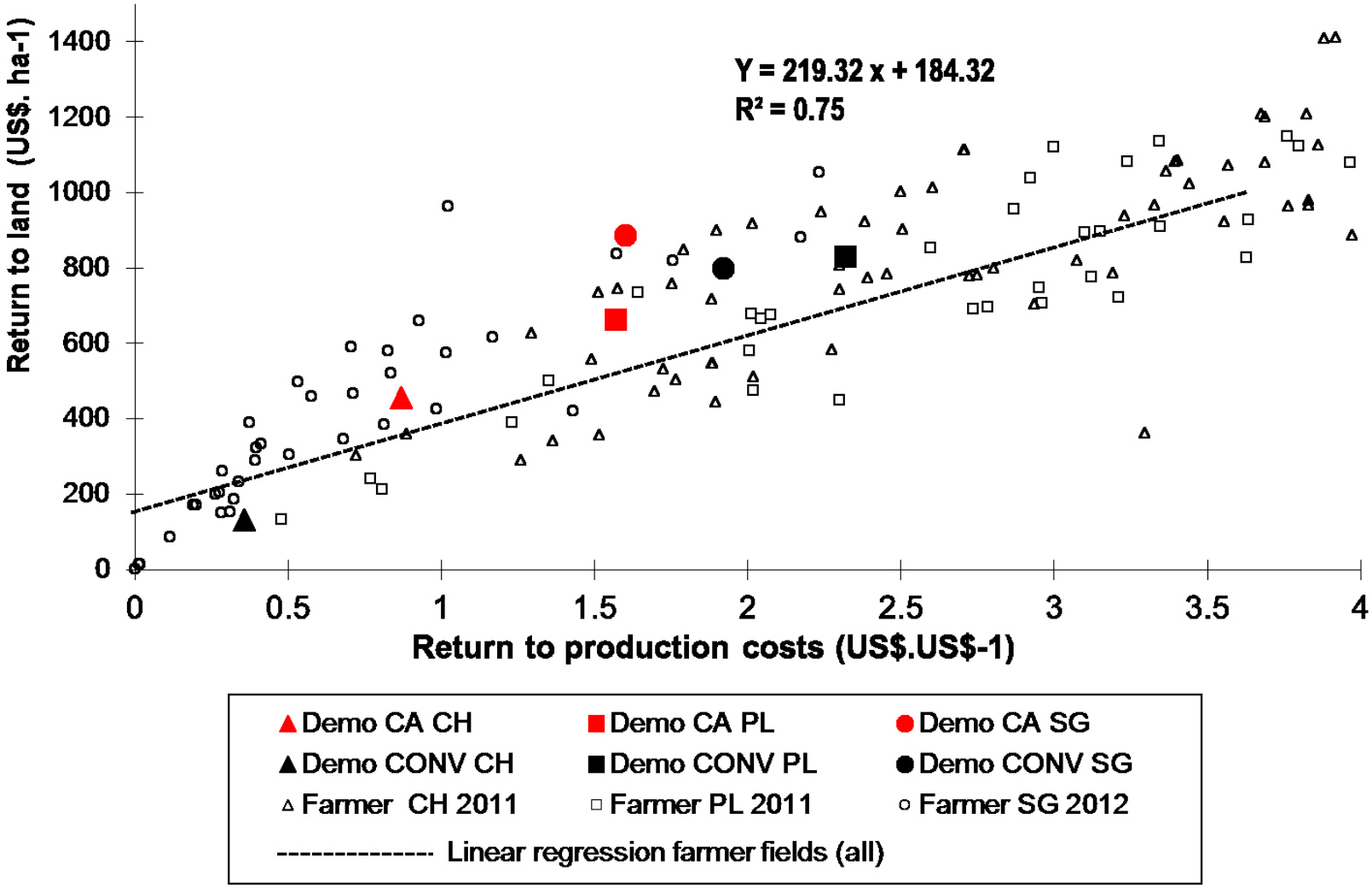
At all sites, CA did not depress maize yields the year of conversion. This result is similar to what was reported by Baldé et al. (2011) in Brazil. The application of sufficiently high levels of fertilisation was assumed counterbalancing higher risks of yield losses in the short-term (Giller et al., 2009). Indeed, smallholder farmers practicing hand-hoe agriculture at low levels of fertilisation may face yield losses when converting to CA (Nyamangara et al., 2013b)
We detected a significant decrease in agronomic performances of all systems between the first and second year of demonstration. We assume that this result can be explained by a temporary drought before maize flowering at Chieng Hac and Suoi Giang, and by a weed infestation at Phieng Luong.
In the second year of demonstration, CA increased maize grain yields by 0.8 to 1.1 t.ha-1 compared to conventional agriculture. We assume that this increase in maize yields was mainly due to the improvement of water balance under CA in a drought context at two sites. This result is therefore to be confirmed from investigation of other climatic sequences. Hence, in places of Asian humid tropics where soil erosion occur due to continuous tilled monocropping on slopes, the short term impact of CA on yields is expected coming from improved nutrient availability through erosion control and nutrient restitutions rather than improved water balance. Recording higher yields with CA frequently requires at least two years under smallholder farming, as it was reported in Zambia (Thierfelder et al., 2013) and Ethiopian highlands (Araya et al., 2012).

Table IV-8. Two-year production costs, labour uses and returns to land, labour and production costs compared for rotational option at the three sites

		Acceptability		Economic profitability		
Site	Rotational option	Production cost (USD.ha-1)	Labour use (day.ha-1)	Return to land (USD.ha-1)	Return to labour (USD.day-1)	Return to production cost (USD.USD-1)
CH	CS 1 (Maize monocropping)	1125 [b]	397 [a]	1247 [a]	3.22 [a]	1.29 [a]
	CS 2 (Rotation maize – peanut)	1289 [a]	199 [b]	-661 [c]	-3.38 [c]	-0.47 [c]
	CS 3 (Rotation maize – rice)	990 [c]	311 [b]	190 [b]	-0.24 [b]	0.26 [bc]
	CS 4 (Rotation maize – cassava)	1297 [a]	420 [a]	579 [b]	2.22 [a]	0.56 [b]
PL	CS 1 (Maize monocropping)	1080 [b]	328 [b]	1402 [b]	4.55 [c]	1.49 [b]
	CS 2 (Rotation maize – peanut)	1065 [b]	307 [b]	2385 [a]	7.80 [a]	2.46 [a]
	CS 3 (Rotation maize – rice)	990 [b]	360 [b]	2042 [a]	5.78 [b]	2.51 [a]
	CS 4 (Rotation maize – cassava)	1219 [a]	479 [a]	825 [c]	1.75 [d]	0.80 [c]
SG	CS 1 (Maize monocropping)	1573 [a]	744 [a]	1772 [b]	2.44 [a]	1.32 [a]
	CS 2 (Rotation maize – peanut)	1427 [ab]	671 [a]	2591 [a]	3.88 [a]	1.99 [a]
	CS 3 (Rotation maize – rice)	1290 [bc]	666 [ab]	1549 [b]	2.38 [a]	1.40 [a]
	CS 4 (Rotation maize – cassava)	1363 [b]	542 [b]	1674 [b]	3.25 [a]	1.40 [a]

At a given site, values within a column followed by the same letter are not significantly different for rotational option (Fisher LSD, P > 0.05

Figure IV-7. Annual return to land computed against annual return to production costs compared between demonstrations sites and neighbouring farmers fields. Values for farmer fields refers to cropping seasons 2012 (Suoi Giang) and 2011 (Phieng Luong and Chieng Hac). Economic values at demonstration sites were averaged to one year from the whole two year crop sequence. CH: Chieng Hac; PL: Phieng Luong; SG: Suoi Giang; CA: Conservation Agriculture; CONV: Conventional Agriculture. Demo = demonstration site; Farmer = Farmer field.



Given the high spatial yield variability in neighbouring farmers' fields, the extent to which farmers will detect a yield improvement when converting to CA can also be questioned.

4.2. Does equivalent economic profitability make CA worth for farmers?

It was possible to design CA systems that exhibit equivalent economic profitability to tilled maize monocropping in only two years while requiring equivalent labour use, even though considering that cover plants have no commercial value. This finding completes the conclusion formerly made by Affholder et al. (2010), who shown than CA decreased economic profitability when accounting for the sole year of conversion. Nonetheless, equivalent economic profitability over two years does not necessarily make conversion to CA worth for farmers. Furthermore, CA required at all sites higher production costs than conventional farming, due to additional purchases of seeds and non-locally available herbicide. Higher production costs under CA were reported for other contexts of smallholder farming such as in Malawi (Ngwira et al., 2012), Laos (Lienhard et al., 2013) and Vietnam (Affholder et al., 2010). The extent to which the increase of production costs can be compensated by savings on tillage costs and/or higher sales depend on economic contexts and cropping systems.

4.3. Investigating stepwise conversion to CA

Higher production costs under CA may deter smallholder farmers from adopting. There is therefore a need to develop *ad-hoc* strategies to overcome such constraint. Convergent conclusion was made by the few authors who have investigated CA options in Vietnamese highlands (Affholder et al., 2010; Marohn et al., 2012; Martin et al., 2004; Vu Dinh et al., 2012). Designing incentives is a possible strategy. Another possibility consists in promoting a stepwise conversion to CA, in which no tillage is firstly implemented alone then cover plants cultivated only from the moment no-till has demonstrated evidence of higher agronomic performances.

4.4. Integrating field-scale environmental impact assessment

Simultaneously considering a limited set of field-scale indicators of agronomic and economic performances was relevant to preliminary investigate the short-term attractiveness of complex cropping systems, including crop rotations and associated cover plants. More accurate monitoring of indicators of agronomic efficiency remains required to account for the underlying process driving cropping system performances. Incorporating indicators of environmental impact of agriculture (van der Werf and Petit, 2002) would contribute to refine cropping system evaluation.

4.5. Investigating transition to CA with bio-economic farm models

The assessed options were under prototyping at the time they were demonstrated to farmers. The present analysis therefore corresponds to an *ex-ante* assessment of CA performances based on the reality of transition stage described by Erenstein (2003), in which both farmers and researchers are adjusting prototypes to make them viable. Our results suggest that the duration of transition to CA should be assessed (i) with regards to specific objectives, such as increasing yields or increasing economic profitability, (ii) for clearly defined levels of intensification, and (iii) integrating farmer's rationale, including the hierarchy of drivers that account for decision to convert to CA.

Bio-economic farm models account for effective method to conduct such multi-temporal evaluation. They would in particular allow *ex-ante* investigating CA economic attractiveness for contrasted farms and for a range of biophysical and economic scenario.

Records of agronomic and economic performances for conventional farming were coherent between on-farm sites and neighbouring farmers' fields. We therefore believe that data from on-farm demonstrations can be incorporated into such models. The requirement for complementary data collection is limited. It especially includes a typology of farming systems differentiating constraints in access to means of production. Exploration by models should however consider the high spatial and inter-annual variability of performances observed in farmers' fields under conventional farming.

Efforts are still required to refine prototyped systems and tailor them to farmers' needs. Further evaluation should incorporate alternative options, such as zero tillage without cover plants or conventional tillage with associated crops. It is also necessary to investigate the added value of combining CA with complementary protection measures to maintain mulch on slopes, such as terraces or vegetative barriers (Guto et al., 2012). Most of the ecosystem services expected from CA indeed rely on biomass maintained at field prior the moment crop growth allows soil to be covered. Maintaining on steep slope the minimum amount of mulch biomass to provide expected ecosystem services is a critical issue since it can be washed away by rains (Giller et al., 2011) and subjected to trade-offs among diverse but important uses (Giller et al., 2011; Lal et al., 2007; Naudin, 2012; Valbuena et al., 2012).

5. Conclusion

Using empirical field-scale data from three on-farm demonstration sites in tropical highlands of Vietnam, we investigated to which extent conservation agriculture (CA) practiced on sloping land can be more productive and profitable than conventional farming in two years.
Within the context of our study, CA significantly improved yields and agronomic efficiency the second year after conversion. Improvement of agronomic performances was not sufficient to ensure better economic performances than conventional tillage over two years. The increase in production costs associated with conversion to CA cancelled the benefit of the increased agronomic productivity.
Higher production costs may deter farmers from adopting CA spontaneously, even though economic profitability is equivalent. Making conversion to CA worth within two years for cash-constrained smallholder farmers thus requires considering the following options : on-farm or marketable valorisation of cover plants, stepwise conversion to CA, and policy-level implication supporting smallholder farmers in overcoming conversion stage. Further research is needed to investigate CA economic attractiveness for contrasted farms, taking into account differentiated time-effects on expected performances. We believe that developing bio-economic farm models for that purpose would in turns guide prototyping of more relevant technical options for smallholder farmers.

6. Acknowledgments

This research was funded by the ADAM project (Support to Extension of Conservation Agriculture in Mountainous areas of Vietnam) upon the French Agency for Development and the RIME-PAMPA project (Multi-Country Program to support Agroecology Extension). We are grateful with farmers and authorities of Yen Bai and Son La Province for their time and willingness to answer our questions. We are also thankful to Cécile Fovet-Rabot for her comments on earlier versions of this paper.

Chapitre V. Discussion générale et perspectives

1. Rappel des objectifs de la thèse

L'objectif général de la thèse était de construire une évaluation *ex-ante* de l'attractivité technico-économique de systèmes de culture alternatifs en agriculture familiale au Sud. Cette problématique a été abordée pour l'agriculture de conservation dans le contexte particulier de l'agriculture de montagne du Nord Vietnam, où l'extension de la monoculture de maïs labouré sur pentes génère des questions sur la durabilité des agro-écosystèmes. Nous avons distingué trois objectifs de recherche pour répondre à cette question.

Objectif 1 : Analyser les performances agronomiques, économiques et environnementales des systèmes agricoles présents dans une région présentant une forte hétérogénéité biophysique et socio-économique afin d'identifier les niches dans lesquelles l'agriculture de conservation est potentiellement adéquate pour répondre aux enjeux de durabilité.
Objectif 2 : Evaluer si l'évolution à court terme des performances agronomiques de l'agriculture de conservation est suffisante pour amener de petits producteurs familiaux à la considérer comme une opportunité économiquement attractive
Objectif 3 : Déterminer les conditions dans lesquelles des dispositifs de démonstration-formation mis en place pour promouvoir l'agriculture de conservation peuvent être également mobilisés pour une évaluation scientifique des performances de ces systèmes.

En lien avec ces objectifs de recherche, nous proposons dans ce chapitre une lecture critique des hypothèses émises et des résultats obtenus afin de dégager les acquis et clarifier les principales limites de ce travail. Nous rappelons tout d'abord brièvement les résultats obtenus, en mettant l'accent sur leurs domaines de validité et leur implication pour le développement. Nous explicitons ensuite les perspectives d'amélioration générées par la reconsidération des postulats sous-jacents aux différentes étapes de ce travail. Parmi les facteurs qui limitent la qualité et la portée des résultats obtenus, nous traitons plus particulièrement de quatre limites transversales aux objectifs retenus et des perspectives scientifiques qui leur sont associées. Ces limites sont :
(i) l'intégration des aspects fonctionnels dans l'évaluation des systèmes agricoles, c'est-à-dire les processus biophysiques sous-jacents aux performances agronomiques des systèmes de culture ainsi que les logiques d'acteurs associées à la diversité des types de systèmes agricoles;
(ii) l'intégration de la variabilité spatio-temporelle dans l'évaluation de performances des systèmes de culture ;
(iii) l'intégration de différentes échelles spatiales et temporelles dans les indicateurs construits en incluant des seuils de faisabilité et d'optimalité[4] ;
(iv) la nécessité d'une analyse de l'attractivité des systèmes de culture couplée aux types de systèmes de production identifiés (pour les agriculteurs et pour les décideurs).
Nous discutons enfin des perspectives d'amélioration de l'utilité scientifique de dispositifs matriciels de création-formation-diffusion pour la conception-évaluation de systèmes de culture en agriculture de conservation, en envisageant d'une part les possibilités de leur couplage à de la modélisation et d'autre part l'analyse de leur contribution aux processus locaux d'innovation.

[4] En présence d'externalités, par exemple environnementales, on peut distinguer un seuil d'impact (valeur à partir de laquelle un processus de dégradation environnementale est engagé), un seuil de faisabilité (correspondant au niveau minimum de dégradation environnementale pouvant raisonnablement être atteint eu égard à la nécessité de certaines activités dans un écosystème déterminé) et un seuil d'optimalité (valeur représentant, au sens de Pareto, le niveau le plus bas d'impact environnemental qui puisse être atteint sans détériorer d'autres composantes de la durabilité).

2. Les principaux résultats obtenus, leur domaine de validité et leur implication pour le développement

2.1. Principaux résultats obtenus

Les principaux résultats obtenus sont :

(i) Trois méthodes reproductibles et pour partie génériques permettant respectivement :

- De réduire la dimensionnalité du diagnostic agraire, dans une première phase exploratoire et à une échelle régionale (i.e. réduire le nombre de facteurs à prendre en compte dans l'analyse de la diversité des systèmes agricoles, hiérarchiser leur importance et explorer le lien entre systèmes de culture et systèmes de production). Cette méthode est applicable à d'autres contextes, sous réserve des hypothèses émises quant aux facteurs explicatifs de la diversité des systèmes de culture ;
- D'évaluer les performances agro-économiques de systèmes de culture complexes (rotations de cultures et plantes de couverture associées en relais) sur l'horizon d'une rotation biennale et à l'échelle du champ cultivé;
- D'analyser dans une perspective méta-analytique limitée les données issues de sites de démonstration-formation conçus dans une optique de développement et non de recherche scientifique, en conceptualisant un dispositif statistique en surcouche des données de terrain (validation de l'hypothèse H3b).

(ii) Trois résultats spécifiques au contexte étudié (aux plans géographique, économique, et temporel), de portée locale :

- La diversité régionale des systèmes de culture maïsicoles s'explique par des facteurs de variabilité territoriale prévalant sur les caractéristiques biophysiques des parcelles cultivées plutôt que par les caractéristiques socioéconomiques des exploitations agricoles et des chefs d'exploitation. Ce résultat infirme l'hypothèse H1a (diversité des systèmes de culture pour une production déterminée s'expliquant principalement par les différences structurelles entre exploitations dans un contexte de forte hétérogénéité biophysique et socio-économique)
- La diversité régionale des systèmes de culture conventionnels génère des écarts de durabilité (« sustainability gaps ») contrastés entre les systèmes (validation de l'hypothèse H1b);
- Dans les situations économiques et biophysiques analysées, l'amélioration des performances agronomiques en agriculture de conservation sur pente la seconde année après conversion ne suffit pas à générer une meilleure rentabilité économique dans un horizon de deux années. Toutefois, l'agriculture de conservation peut générer une rentabilité équivalente aux systèmes de culture conventionnels en considérant ces deux années (validation de l'hypothèse H2).

Notre travail valide par ailleurs partiellement l'hypothèse H3a, selon laquelle les performances des systèmes de culture comparés sur des sites de démonstration-formation sont représentatives des performances obtenues par des agriculteurs soumis aux mêmes conditions. Elles sont donc mobilisables pour construire une évaluation *ex-ante* de systèmes de culture alternatifs.

2.2. Implications pour le développement

En terme d'implication pour le développement, la **typologie structurelle d'exploitations** que nous avons générée permet d'émettre de nouvelles hypothèses (tableau V-1) sur :

(i) La nature des systèmes innovants à construire pour et avec différents types de bénéficiaires

- Des systèmes de culture en agriculture de conservation manuelle peuvent être plus appropriés pour les agriculteurs des types A et B qui font face à des difficultés d'accès à la traction animale. A l'inverse, les agriculteurs des types C, D et E disposent de traction animale ou motorisée, qu'il paraît donc nécessaire d'incorporer dans les systèmes à construire pour et avec eux.
- Les producteurs des types C, D et E conduisant des ateliers d'élevage, il est probable qu'ils soient plus particulièrement sensibles à des systèmes de culture permettant de mieux intégrer agriculture et élevage (consommation limitée des couvertures pour réduire le déficit fourrager et/ou réduire la dépendance aux concentrés industriels).

(ii) Les types d'exploitations agricoles pour lesquelles l'agriculture de conservation est susceptible de présenter un intérêt

- Les producteurs des types A et B sont très fortement contraints économiquement (faible trésorerie d'exploitation, absence d'accès au crédit formel), et ces contraintes sont prioritaires par rapport à un investissement à moyen ou long terme pour réduire les risques d'érosion et préserver la fertilité des sols.
- Bien que les producteurs des types C et E disposent de capacités d'investissement dans l'agriculture de conservation, ces exploitations ont déjà engagé des activités extra-agricoles (prestations de service de transport, labour, traitement et transformation post-récolte, commerce d'intrants) et/ou non agricoles (pluriactivité), réduisant l'intérêt d'investir dans des innovations visant à intensifier durablement la production agricole.
- Dans le développement de l'agriculture de conservation, il parait donc raisonnable de cibler prioritairement les producteurs du type D, lesquels sont par ailleurs les plus fortement dépendants de l'agriculture sur pentes à base de cultures annuelles.

Tableau V-1. Principales implications de la typologie de systèmes de production pour le développement de l'agriculture de conservation au Nord Vietnam (identification de niches d'innovation)

Caractéristiques des types de systèmes de production	Implications pour le développement de l'agriculture de conservation	Type de système de production concerné				
		A	B	C	D	E
	Avantages					
Accès à la traction animale et/ou motorisée	Incorporer la traction animale et/ou motorisée dans les systèmes proposés			X	X	X
Ateliers d'élevage familiaux contribuant significativement aux revenus d'exploitation	Viser une intégration de l'élevage (consommation partielle des plantes de couverture)			X	X	X
Capacités d'investissement plus importantes	Viser des systèmes à niveau d'intensification élevé & envisager des systèmes offrant un espoir de gain à plus long terme				X	X
	Contraintes					
Difficultés d'accès à la traction animale	Viser le développement de systèmes en agriculture manuelle	X	X			
Faibles marges de manœuvre économiques	Viser des systèmes à faible niveau d'intensification et/ou retour sur investissement immédiat	X	X			
Incorpore des exploitations en situation de forte pauvreté	Accompagnement spécifique et / ou cibler prioritairement d'autres types d'exploitation pour le développement de l'agriculture de conservation (Appui financier à court terme plus prioritaire)	X	X			
Engagement dans des activités non-agricoles	Réduit l'opportunité d'investir dans l'agriculture de conservation → Cibler prioritairement d'autres types d'exploitation			X		X

La typologie de systèmes de culture que nous avons élaborée permet également d'émettre des hypothèses sur la **nature des systèmes de culture alternatifs à envisager** :

- Dans les systèmes de cultures conventionnels, l'usage des herbicides (et plus particulièrement de l'atrazine et du paraquat en post-levée des adventices) est actuellement très largement adopté en lorsqu'il est réalisable. L'usage d'herbicides en général et de l'atrazine en particulier constitue un facteur critique de la durabilité environnementale des systèmes conventionnels. Dans les systèmes de culture en agriculture de conservation mis en évaluation, l'usage d'herbicides pour le contrôle des couvertures et la préparation du mulch étaient également essentiels pour assurer leur durabilité économique à court terme. D'autres molécules que l'atrazine ont été utilisées[5], essentiellement glyphosate, paraquat et 2,4 D. En effet, de nombreuses couvertures associées en culture relais ne sont pas compatibles avec l'usage antérieur d'atrazine au cours du même cycle cultural. L'utilisation de telles molécules en agriculture de conservation se fait ici à faible coût d'opportunité à court terme (pas de difficultés particulières d'apprentissage pour les producteurs). Toutefois, le recours aux herbicides dans les systèmes de culture en agriculture de conservation constitue un élément de fragilité de ces systèmes au plan de leur durabilité environnementale à long terme. Ceci implique que la conception de stratégies de gestion de l'enherbement minimisant l'usage et/ou l'impact environnemental des herbicides (fonction d'interception du mulch ?) est une piste de recherche à explorer pour améliorer la durabilité des systèmes y compris en agriculture de conservation.
- Il est nécessaire de concevoir une gamme de systèmes alternatifs à différents niveaux d'intensification, et en particulier de fertilisation, pour répondre à la diversité des pratiques, en liaison notamment à des capacités différenciés d'investissement des producteurs.

Aux conditions observées, les résultats obtenus en matière de **performances des prototypes de systèmes de culture** permettent d'émettre des hypothèses sur :

(i) La nature des systèmes à construire pour et avec les acteurs.

- Des rotations biennales en agriculture de conservation constituent une alternative crédible à la monoculture de maïs sur pente, que ce soit au plan agronomique (pas de perte de productivité ni d'efficience des intrants ou de la pluviométrie en première année) ou au plan économique (rentabilité équivalente en considérant un horizon de deux ans)
- En l'absence de subventions, une valorisation partielle des plantes de couverture utilisées en agriculture de conservation au sein de l'exploitation (valorisation des graines de *Mucuna sp.* pour l'alimentation porcine, valorisation fourragère du *Stylosanthes guyanensis* ou des *Brachiaria spp.)* et/ou une valorisation commerciale (vente de semences ou du haricot-riz (*Vigna umbellata*) pour la consommation humaine) sont nécessaires pour garantir une meilleure rentabilité économique que les systèmes en agriculture conventionnelle ;

5 L'utilisation de 2,4 D, classiquement employé dans le contrôle des couvertures végétales, s'est révélé difficilement envisageable à diffuser au Vietnam, ce pour des raisons historiques. L'agent orange épandu durant la guerre du Vietnam était en effet constitué d'un mélange de 2,4-D et de 2,4,5-T. Il a été découvert ultérieurement que la synthèse du 2,4,5 T générait la toxine tératogène TCDD (2,3,7,8-tétrachlorodibenzo-para-dioxine), avec les conséquences que l'on connait. Cette toxine spécifique est absente du processus de synthèse du 2,4 D.

- Dans un contexte biophysique ou la productivité de biomasse n'est pas le principal facteur limitant des performances de systèmes de culture en semis direct sur couvert végétal et où il n'existe pas de niche économique particulière pour la valorisation des plantes de couverture, d'autres schémas que ceux testés peuvent être plus pertinents à court terme pour les producteurs. Ceux-ci incluent en particulier des systèmes avec semis direct sur résidus -de culture et d'adventices- mais sans plante de couverture associée. Dans une perspective similaire se pose la question d'une conversion par étape à l'agriculture de conservation, l'introduction de plantes de couverture dans les systèmes étant différée au moment où les systèmes en semis direct sous couvert de résidus bénéficient de l'effet cumulé à long terme du mulch sur la fertilité du sol

(ii) la durée minimale de temps à considérer, aux conditions économiques actuelles, pour que les systèmes proposés deviennent plus rentables que l'agriculture conventionnelle.

- Deux années en agriculture de conservation ne permettant d'obtenir qu'une rentabilité équivalente à l'agriculture conventionnelle, il en ressort qu'un minimum de trois années est nécessaire pour espérer bénéficier d'une meilleure rentabilité de l'agriculture de conservation sur pentes en l'absence de valorisation économique des plantes de couverture.

(iii) les politiques d'accompagnement à la diffusion de l'agriculture de conservation

- Des incitations peuvent être nécessaires lors de la phase de conversion à l'agriculture de conservation pour compenser l'augmentation des coûts de production.

L'existence d'écarts de durabilité contrastés entre systèmes de culture conventionnels permet enfin de tirer diverses implications pour le développement détaillées au chapitre 3. Nos résultats suggèrent en particulier l'existence d'un risque d'érosion généralisé et des pratiques minières de la fertilité des sols, en relation avec des balances potassiques nettement négatives. Dans le cas des systèmes les plus intensifs (SC 21 et 32), nous avons enregistré des balances azotées et phosphatiques très excédentaires suggérant la possibilité de progrès agronomiques substantiels dans la gestion intégrée des éléments minéraux. A l'exception des systèmes n'incorporant pas l'usage d'herbicides (e.g. à l'exception des SC 2.1 et 2.2.1), nous avons identifié l'existence de forts risques environnementaux à l'échelle du champ cultivé en lien avec l'application d'atrazine à des doses très élevées. Nous avons relevé des indices de trappe de pauvreté dans les systèmes de culture les moins intensifs (SC 11 et 12), s'ajoutant à un risque d'impact environnemental élevé (SC 12).

2.3. Domaine de validité des résultats et identification des biais

Le domaine de validité de nos résultats est limité par l'échantillonnage (spatial, temporel et social), la nature des systèmes de culture retenus dans l'analyse, les partis-pris méthodologiques et certains éléments d'analyse (Tableau V-2).
Sans prétendre à l'exhaustivité, il peut par ailleurs être identifié différents types de biais et risques de biais, notamment relatifs aux modalités d'intervention, aux mesures effectuées, à l'information disponible et à l'analyse qui a été faite des données (Tableau V-3).
Nous discutons dans les sections qui suivent de différentes perspectives à envisager pour améliorer le domaine de validité des résultats.

Tableau V-2. Principales limites de validité inhérentes au travail réalisé.

Type de limite de validité	Catégoriser les systèmes de cultures pour identifier des écarts de durabilité (chapitre 3)	Conversion à l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (chapitre 4)
Echantillonnage spatial	Absence de situations réellement enclavées et non intégrées au marché bien qu'elles correspondent encore à une réalité dans le Nord Vietnam et qu'elles posent des problèmes de durabilité	Faible nombre de contextes biophysiques traités (sol, pente, altitude, pluviométrie) + absence d'analyse de situations mécanisées sur pentes à 2 cultures par an, résultats dont le domaine de validité est limité au contexte et aux séquences climatiques étudiées
Echantillonnage temporel	Performances des systèmes agricoles évaluées à partir d'une seule année culturale → variabilité temporelle des performances non considérée	- Seulement 3 séquences climatiques analysées pour traiter des « 2 années après conversion », or forte variabilité interannuelle tant climatique qu'économique - Performances des systèmes de culture évaluées à partir de 2 campagnes agricoles (court-terme)
Echantillonnage social	Analyse centrée sur les producteurs (autres acteurs non pris en compte)	- Attractivité économique considérée du point de vue d'un agriculteur « virtuel » ayant la capacité à envisager d'investir dans l'agriculture de conservation avec une espérance de gain économique supérieur dans un horizon d'au moins deux ans
Echantillonnage des systèmes de culture	Analyse limitée ici aux seuls systèmes de culture maïsicoles	- Performances de l'agriculture de conservation évaluées sur la base d'une gamme limitée de systèmes conçus pour une valorisation locale (représentativité ?) - Absence de systèmes de culture intermédiaires (sur résidu sans plantes de couverture / sans résidus avec plantes de couverture) - Evaluation de systèmes conçus avec une faible mobilisation de ressources phyto-génétiques locales
Intervention et démarche méthodologique	Parti-pris d'absence de conception validation participative et de socialisation des indicateurs utilisés / retenus	- Performances de prototypes de systèmes de cultures en AC évaluées *ex-ante* à partir de données collectées sur des sites de démonstration, et non en milieu réel - Systèmes de culture analysés correspondants à des prototypes à dire d'expert, sans co-conception - validation des systèmes par les bénéficiaires visés
Analyse	Performances économiques des systèmes d'élevage évaluées sur la base des flux d'une année, ce qui est une approximation de la réalité eu égard à i/ la gestion du cheptel bovins / bubalin et ii/ aux aléas exceptionnels (épidémie, froid)	- Evaluation de performances non connectée aux types d'exploitation identifiés (en cours - annexe 1) - Evaluation quantitative à partir de résultats d'essais sans validation des résultats / indicateurs / horizons temporels d'analyse par les agriculteurs

Tableau V-3. Principaux biais inhérents au travail réalisé.

Type de biais	Catégoriser les systèmes de cultures… (chapitre 3)	Conversion à l'AC…. (chapitre 4)
Biais d'intervention et de démarche méthodologique	- Biais d'enquête (enquêteurs, interprétariat, perception de la demande d'information par enquêtés, retranscription….) - Variables économiques évaluées par enquêtes à dire d'acteurs (instrumentalisation possible en dépit des tentatives de triangulation des informations)	- Analyse par types de regroupement plutôt que par facteurs dont les modalités seraient parfaitement identiques d'un site à l'autre
Biais de mesure	- Efficience d'intrants et bilans minéraux approximés à partir de teneurs moyennes en éléments minéraux dans les produits commerciaux (par bibliographie), or ces teneurs varient selon les cultivars et les conditions biophysique de leur culture - Valeurs économiques collectées pour une année unique, - Indicateurs économiques évalués dans un contexte d'inflation à 8% par an sur les dix dernières années	
	- Surfaces approximées à partir de quantité semées - Performances des systèmes de culture conventionnels évaluées à partir de données à dire d'acteurs - Variables biophysiques (parcelles) caractérisées à dire d'acteur	- Temps de travaux et rendements mesurés à partir de parcelles de taille limitée - Pluviométrie évaluée à partir de données hors site - Coûts de production évalués sur site, sans prendre en compte les coûts supplémentaires d'accès aux intrants pour certains producteurs (crédit, transport)
Biais d'information	- Risque sur la validité des données de caractérisation de territoires à partir des statistiques officielles	- Risque sur la validité des données non collectées personnellement
Biais d'analyse	- Interactions entre performances des systèmes de culture et environnement non considérées	- Puissance statistique limitée (faible nombre de répétitions), risque de seconde espèce non évalué

3. Limites majeures et perspectives associées

3.1. Postulats sous-jacents

Le travail réalisé s'appuyait sur trois postulats sous-jacents au choix des méthodes et à l'interprétation des résultats.

3.1.1. Premier postulat sur les modalités d'intensification écologique à promouvoir

Nous avons considéré ici l'agriculture de conservation comme la voie la plus appropriée à l'intensification écologique de l'agriculture sur pentes dans les zones de montagne du Nord-Vietnam. Ceci renvoie à trois postulats distincts:

(1) Il est nécessaire et possible d'intensifier durablement la production agricole sur pentes en zone tropicale humide de montagne.

Les zones de pente visées par notre analyse ont comme point commun de constituer des milieux fragiles fortement sensibles aux risques environnementaux (forte sensibilité à l'érosion en particulier). Elles recouvrent néanmoins un ensemble d'espaces présentant des caractéristiques et potentialités distinctes tant du point de vue économique (coûts de transaction associés aux différentiels d'accès) que biophysique et agronomique : bas de pente mécanisables et aménageables en terrasses permettant de développer un ensemble d'activités agricoles ou non-agricole versus topo-séquences cultivées sur des pentes de plus de 80% ne permettant d'envisager ni traction animale, ni même pulvérisation à dos.

La question de la nécessité d'une intensification durable de la production agricole sur les espaces cumulant le plus grand nombre de contraintes et qui sont les plus fragiles au plan environnemental mérite d'être posée. L'approche classique consiste à distinguer les objectifs de développement selon le type d'espace (intensification et diversification tels que définis par Erenstein (2006) vs. préservation) : les espaces cumulant le plus grand nombre de contraintes sont mis sous protection compte tenu de leur sensibilité aux risques environnementaux (érosion, pertes rapide de fertilité). L'intensification durable de la production est visée dans les situations présentant moins de pentes et/ou un meilleur potentiel agronomique. Si toutefois on conclut à la nécessité d'une intensification durable de la production y compris dans les situations les plus fortement contraintes, la question est alors celle de la forme d'intensification à rechercher (terre, capital ou travail), de la meilleure façon d'y parvenir et de la nature des innovations à promouvoir.

L'agriculture de conservation repose sur le paradigme d'une intensification de la production agricole par unité de surface (rendement et productivité de la terre) associée à une intensification technologique. Dans certaines situations, il peut y avoir un décalage entre ce paradigme et les objectifs prioritaires pour de petits producteurs familiaux s'agissant de la gestion des différents facteurs de production (travail et capital) (Baudron et al., 2012). Nous avons montré que dans le cadre des situations observées, les productivités de la terre, du travail et du capital étaient corrélées. Ceci n'implique pas que la hiérarchie entre ces objectifs soit identique selon les exploitations considérées. Ceci implique en revanche d'envisager des systèmes de cultures alternatifs ajustés à des priorités diverses dans la recherche d'une meilleure efficience des facteurs de production. Dans des conditions de productivité de biomasse non limitante pour les services éco-systémiques visés, mais sans niche économique particulière pour les plantes de couvertures, on peut par exemple se poser la question de la valeur ajoutée (au plan de l'efficience des ressources) de l'intégration de plantes de couverture dans les systèmes de culture par rapport à des systèmes en semis direct sur seuls résidus de culture. Des systèmes sur seuls résidus peuvent ainsi être plus adaptés, au moins à court terme, à la recherche d'une intensification centrée sur le travail et le capital.

(2) L'agriculture de conservation est le mode de mise en valeur le plus adapté pour intensifier durablement la production sur pentes dans les zones de montagne du Nord Vietnam

Ce postulat nous a amené à écarter de l'analyse d'autres modes de mise en valeur du milieu susceptibles d'être porteurs d'intensification durable de la production agricole. En fonction de la position au sein de la topo-séquence cultivée, ces autres modes de mise en valeur comprennent en particulier la conversion en terrasses, en pâturages améliorés ou non, ou encore en cultures pérennes (thé, systèmes agroforestiers). Ces différents modes de mise en valeur sont susceptibles de concilier la production agricole avec le contrôle de la dégradation des sols qui constitue le premier facteur critique de la durabilité environnementale des systèmes de culture sur pente. La perspective tirée de ce constat est la nécessité de réintégrer ces différentes alternatives, seules ou combinées (terrasses et agriculture de conservation par exemple), dans une évaluation comparative des performances de différents systèmes de culture alternatifs qui prenne aussi en compte la diversité des contextes agraires sur pentes.

(3) Les prototypes de systèmes de culture en agriculture de conservation permettant la mise en valeur des zones de pente sont techniquement au point, réalisables et appropriables par de petits producteurs familiaux.

Nous avons mené une évaluation de systèmes de culture en agriculture de conservation en considérant que nous disposions, sur les différents sites de démonstration-formation, de prototypes de séquences cultivées biennales qui soient (1) représentatifs de la gamme envisageable de systèmes de type SCV, (2) techniquement maîtrisés, (3) réalisables par des agriculteurs familiaux pour peu qu'ils aient des parcelles ayant des caractéristiques biophysiques similaires à celles des sites expérimentaux et (4) adaptés à leurs objectifs et contraintes. S'il est difficile de conclure quant à la représentativité des systèmes testés (1), on peut néanmoins être confiant car on se situe ici dans le cadre d'une itération continue entre le diagnostic agraire, l'analyse des contraintes que l'on cherche à lever et des objectifs que l'on cherche à remplir, et la conception par expérimentation de prototypes de systèmes de culture alternatifs. La maîtrise technique des systèmes mis en évaluation (2) doit être considérée comme seulement partiellement vérifiée. En effet, nous ne nous situons pas dans le cadre de l'évaluation de solutions techniques « prêtes à l'emploi » mais bien dans celui d'une évaluation de prototypes en cours de conception, faisant l'objet d'ajustements techniques progressifs au fur et à mesure de l'expérience accumulée par les expérimentateurs. Cette maîtrise technique progressive des systèmes au cours de la période de transition (Erenstein, 2003) est toutefois sans doute comparable à l'apprentissage auquel doivent faire face des agriculteurs lorsqu'ils convertissent leurs parcelles en agriculture de conservation[6]. La faisabilité de ces systèmes (3) peut être considérée comme attestée par leur mise en place sur des sites expérimentaux à des niveaux d'intensification comparables à ceux des paysans auxquels ils sont destinés, sous conditions d'accès aux équipements et intrants spécifiquement employés. Leur opportunité pour de petits producteurs (4) a par ailleurs été pensée dans un cadre prospectif reposant sur le développement de niches commerciales associées aux plantes de couverture employées (par exemple, introduction du *Stylosanthes guianensis* dans les rotations en vue d'une production locale pouvant être proposée à une compagnie laitière agro-industrielle à proximité en substitution à la luzerne déshydratée actuellement importée des Etats-Unis).

[6] À l'expérience près des variations de conditions biophysiques: on peut en effet penser que les agriculteurs bénéficient d'une meilleure connaissance des variations d'états de milieu que les expérimentateurs.

De ce cadre il ressort aussi la nécessité d'analyser ces systèmes dans la perspective d'un compromis à trouver entre d'une part la consommation partielle de la biomasse produite pour améliorer la rentabilité économique des systèmes à court terme, et d'autre part le maintien des services éco-systémiques recherchés qui dépendent de la biomasse produite et maintenue *in-situ* (Naudin, 2012).

3.1.2. Second postulat relatif à la reproductibilité des typologies produites par analyse multivariée

Nous avons postulé que seule une approche positiviste garantissait que les typologies obtenues à partir de nos données seraient reproductibles quel que soit l'utilisateur de ces données. Toute approche typologique implique un choix *a priori* sur les variables à considérer (et donc des hypothèses implicites sur les facteurs pouvant avoir de l'influence sur la diversité des systèmes). Les approches positivistes et constructivistes diffèrent en revanche (i) par la nature des données qui peuvent être considérées et (ii) par l'explicitation des choix sur les variables à retenir parmi celles considérées.

Les approches constructivistes focalisées sur les aspects fonctionnels des systèmes agricoles ont pour avantage la capacité à considérer et inclure plus facilement dans l'analyse un ensemble de variables de natures diverses, y compris des variables purement qualitatives. En revanche, les typologies réalisées en suivant cette approche sont rarement explicites sur les méthodes débouchant sur un choix de variables à retenir. Elles sont de ce fait difficilement reproductibles.

Les approches positivistes centrées sur les aspects structurels des exploitations sont limitées par la nature des données qu'il est possible de considérer dans l'analyse. Le choix des variables à retenir parmi les variables à considérer s'opère en revanche de façon transparente, assurant la reproductibilité des typologies qui en résultent.

3.1.3. Troisième postulat relatif aux conditions d'attractivité économique d'innovations de rupture

Nous avons conduit l''analyse des performances de prototypes de système de culture à l'échelle du champ cultivé, en postulant que c'était d'abord à cette échelle que se jouait l'attractivité de telles innovations pour les agriculteurs. C'est aussi à cette échelle que se jouent les interactions à la base de l'intensification écologique, c'est à dire la dépendance des processus biophysiques fondant les performances des systèmes de culture aux variations de milieu biophysique (type de sol, pente, etc…). Des évaluations plus agrégatives doivent être envisagées, mais ces facteurs seront toujours à considérer.

Ce choix s'est révélé adapté pour tirer des conclusions préliminaires quant aux performances agro-économiques des systèmes de culture mis en évaluation. Les conclusions obtenues constituent un premier jeu de résultats nécessaires pour associer à chaque système de culture et dans chaque milieu des performances.

Toutefois, ceux-ci ne sauraient être considérés comme suffisants eu égard (i) à la variabilité des conditions climatiques susceptible d'affecter les performances dans chaque site et (ii) à la notion d'attractivité économique d'une innovation qui procède également de l'échelle de l'exploitation.

Evaluer à l'échelle des systèmes de production l'attractivité économique d'une innovation de rupture, en lien avec les logiques d'acteurs, les horizons de décision, suggère le recours à des modèles bioéconomiques de ferme. Nous traitons de ce point dans la section 3.2.

Prendre en compte à l'échelle du champ cultivé la variabilité des performances agronomiques des systèmes de culture en fonction de la variabilité des conditions biophysiques suggère le recours à des modèles biophysiques de systèmes de culture.

A cette même échelle, intégrer la flexibilité des décisions techniques en fonction des logiques d'acteurs suggère le développement de modèles de règles de décision. Coupler ces deux approches permet d'envisager la construction de modèles bio-décisionnels. Nous traitons de cet aspect dans la section 3.3

3.2. Mobiliser des modèles bioéconomiques pour explorer l'attractivité d'innovations techniques à l'échelle de l'exploitation

3.2.1. Approfondir l'intégration des aspects fonctionnels dans les typologies de systèmes agricoles pour juger de l'attractivité technique et économique d'innovations de rupture

Nous avons fait le choix de mobiliser des méthodes d'analyse multivariée pour construire, à une échelle régionale, des typologies de systèmes de production et de culture. Les types générés par cette approche ont en commun d'être basés sur les composantes structurelles des systèmes agricoles (opportunités et contraintes dans l'accès aux moyens de production à l'échelle de l'exploitation, principaux traits techniques à l'échelle des systèmes de culture), leurs aspects fonctionnels étant supposés en découler (décisions et positionnement stratégique à l'échelle de l'exploitation, processus biophysiques à l'échelle des systèmes de culture). La méthode a pour avantage de générer une catégorisation des systèmes agricoles qui soit reproductible. Elle occulte néanmoins la complexité fonctionnelle des systèmes agricoles et leurs acteurs.

A l'échelle de l'exploitation, les types de systèmes de production produits par l'analyse multivariée ignorent en premier lieu les trajectoires et conditions de genèse des exploitations agricoles sous l'influence d'une interaction entre milieu biophysique, contexte socio-économique, acteurs et histoire agraire. Par ailleurs, et du fait de l'échelle d'analyse retenue, l'allocation des facteurs de production à différentes activités au cours de la campagne culturale ainsi que la valorisation interne des productions au sein de l'exploitation n'ont pas été considérées. Bien que les systèmes de production soient en partie flexibles, l'adéquation d'innovations de rupture avec le fonctionnement des exploitations (goulets d'étranglement dans la mobilisation des facteurs de production, flux de produits au sein de l'exploitation) a nécessairement un impact sur leur attractivité. Ceci milite pour une analyse *ex-ante* de l'attractivité des innovations techniques conduite à une échelle plus localisée, qui permette d'intégrer les différents aspects cités en considérant des types de systèmes de production affinés localement.

3.2.2. Adosser l'évaluation de l'attractivité économique des systèmes de culture à différents horizons temporels de décision en lien avec les capacités économiques et l'espérance de gain des acteurs

Nous nous sommes placés ici du point de vue d'un agriculteur pour lequel l'attractivité d'une innovation de rupture dépendait en premier lieu de sa rentabilité économique (mesurée par l'efficience des facteurs de production, c'est-à-dire productivité de la terre, du travail et du capital) à court-terme (ici deux années), associée à des coûts de production et de travail acceptables et auxquels sont subordonnés les critères de performances agronomiques. De ce fait, notre travail ne traite que d'un raisonnement d'acteur particulier (rationalité économique complète dans un contexte où l'accès au marché et aux intrants n'est pas limitant) dans un horizon de temps unique.

D'une part, certaines exploitations sont si contraintes au plan de la trésorerie et de l'accès au crédit formel que même un investissement limité à la saison culturale (intrants) est problématique.

D'autre part, l'extension des cultures pérenne (thé, café) dans la région étudiée atteste que certains producteurs opèrent des décisions stratégiques en considérant un retour sur investissement dont la durée est supérieure à cinq ans, associé à une espérance de gain supérieure à terme et / ou à l'anticipation d'une réorganisation de l'exploitation (transmission par exemple).
Les décisions stratégiques prises par les agriculteurs sont adossées à des horizons temporels variés, en lien notamment avec les marges de manœuvre économiques et l'espérance de gain à terme. Ceci implique d'abord que des durées plus courtes et plus longues doivent être conjointement considérées dans l'analyse des performances technico-économiques d'innovations de ruptures telles que celles que nous avons évaluées. Ceci implique aussi que le choix des alternatives (horizon temporel et systèmes conventionnels de référence) auxquelles on compare l'agriculture de conservation joue un rôle essentiel dans son évaluation. La mobilisation de modèles bioéconomiques dans l'analyse des performances de l'agriculture de conservation apparait de ce fait complémentaire de l'évaluation in situ d'indicateurs de performances pour explorer la diversité des systèmes de référence envisageables et des horizons temporels à considérer.

3.2.3. Mettre en relation les performances agro-économiques de l'agriculture de conservation avec les types de systèmes de production

Plusieurs méthodes existent pour analyser de façon *ex-ante* l'adéquation d'innovations techniques avec les objectifs de performance agronomique, de viabilité économiques et de durabilité environnementale (Janssen and van Ittersum, 2007). Ces méthodes comprennent les modèles bioéconomiques de fermes, les systèmes multi-agent, les cartographies de risque environnemental, l'analyse de cycles de vie, l'évaluation d'impact environnemental et la construction d'indicateurs agro-environnementaux (Payraudeau and van der Werf, 2005).
Nous avons ici évalué l'attractivité économique *ex-ante* de systèmes de culture en agriculture de conservation (chapitre 4) sur la seule base d'indicateurs des performances des prototypes testés au sein de dispositifs expérimentaux de création–diffusion. L'attractivité de l'agriculture de conservation a été évaluée dans les conditions économiques actuelles et n'a pas été mise en relation avec les types de systèmes de production préalablement identifiés. Une telle analyse reste à construire (Blazy et al., 2009a) pour pouvoir en particulier caractériser :

(i) les conditions nécessaires pour que les prototypes de systèmes de rupture testés deviennent économiquement acceptables pour un type de système de production déterminé ;
(ii) la sensibilité de l'attractivité économique de ces systèmes aux variations des conditions économiques ;
(iii) la sensibilité de l'attractivité économique de ces systèmes aux différentiels de dynamiques de performances entre agriculture de conservation et agriculture conventionnelle selon différents pas de temps.

Les modèles bioéconomiques de ferme font partie de la modélisation ad-hoc (Affholder et al., 2012), les rendant appropriés pour le seul contexte dans lequel ils ont été définis. (Affholder, 2001). Ce sont des outils appropriés pour évaluer *ex-ante* l'impact agronomique, économique et environnemental d'innovations techniques à l'échelle de l'exploitation (Janssen et al., 2010). Par opposition aux simulations de règles de décision (Dounias et al., 2002), les modèles bioéconomiques de ferme ne cherchent pas à reproduire le détail des logiques de prise de décision des agriculteurs.
Ils reposent sur la maximisation (minimisation) d'une fonction d'utilité dont la définition correspond à une hypothèse préliminaire sur les décisions stratégiques d'acteurs.

Les modèles bioéconomiques de ferme optimisent l'allocation des facteurs de production à un jeu d'activités possibles pour un horizon temporel déterminé et un ensemble de contraintes d'exploitation. En d'autres termes, ils relient des formulations décrivant les décisions de gestion des facteurs de production à des formulations qui représentent les inputs / outputs associés au jeu d'activités envisagées (Janssen and van Ittersum, 2007).
Le développement d'un modèle de ferme a été initié dans le temps de la thèse pour explorer plus spécifiquement les variations d'attractivité économique de l'agriculture de conservation pour différents types de fermes, selon différents horizons temporels et des scénarios de différentiels de performances entre agriculture conventionnelle et agriculture de conservation au cours du temps. Ce modèle dont des résultats préliminaires sont rapportés en annexe 1, n'a pas pu être finalisé à temps pour être inclus dans ce travail.

3.3. Développer des modèles de règles de décision à l'échelle des systèmes de culture pour rendre compte de la flexibilité des pratiques et des logiques d'acteurs

Les systèmes de culture conventionnels ont d'abord été analysés à une échelle régionale (chapitre 3), selon l'acception anglo-saxonne du concept de cropping systems, qui les définit comme « the crops and crop sequences and the management techniques used on a particular field over a period of year » (Nafziger, 2013). Cette définition plus restrictive que le concept francophone (Sébillotte, 1974) conduit à considérer les techniques plutôt que les pratiques d'acteurs et leurs logiques. Ceci a participé d'une approche statique des pratiques agricoles, qui rend compte de leurs aspects stratégiques annuels (choix variétaux par exemple) et séquentiels (ordre des opérations culturales), mais ignore leurs composantes tactiques. De ce fait, l'approche mobilisée ne rend pas compte du fait que les pratiques de production sont à la fois (1) dynamiques et (2) évolutives, en fonction (3) de logiques d'acteurs sous-jacentes. La dimension dynamique des pratiques de production (1) renvoie aux choix techniques réalisés en fonction de l'évolution des conditions biophysiques au cours de la saison culturale (comme par exemple la pression des adventices qui oriente le mode de gestion de l'enherbement). La dimension évolutive (2) renvoie aux modifications des modes de gestion d'une année à l'autre en fonction, d'une part, des évolutions de contexte (information et innovation disponible, conditions de marchés), et d'autre part de la maîtrise itérative des conséquences de choix techniques opérés antérieurement. Enfin, les pratiques de culture résultent de logiques d'acteurs sous-jacentes (3) qui intègrent des objectifs et contraintes à des échelles supérieures à celle du champ cultivé.
Prendre en compte ces dimensions additionnelles peut s'envisager par le développement de modèles de règles de décision. Les modèles de règles de décision s'appliquent à une gamme de décisions à différents niveaux d'intégration, incluant notamment la gestion opérationnelle d'une culture particulière (Barrabe et al., 2007; Dounias et al., 2002), la gestion tactique et séquentielle des opérations culturales (Dounias et al., 2002), les processus de décision stratégique (choix de cultures) (Dury et al., 2010) pouvant inclure de la flexibilité (choix de rotations culturales) (Nielsen et al., 2011). Les modèles simulant les règles de décisions se réfèrent implicitement aux modèles d'action consistant en (1) un ou plusieurs objectifs guidant les décisions techniques prises par les agriculteurs (2) un programme d'action qui organise ces décisions dans le temps (3) un jeu de règles de décision et (4) un jeu d'indicateurs (Dounias et al., 2002). Les modèles simulant les règles de décision peuvent être couplés à des modèles sol-plante centrés sur les aspects de performance biophysique dans des modèles bio décisionnels uniques (Bergez et al., 2010).
Quel que soit le type de modèle retenu, une telle perspective suppose l'exploration approfondie des logiques d'acteurs.

Compte tenu de la diversité des contextes rencontrés en zone de montagne, ceci implique également de focaliser une telle exploration sur des types de systèmes de culture affinés localement.

3.4. Intégrer la variabilité spatio-temporelle dans l'évaluation des performances des systèmes agricoles

Le domaine de validité des conclusions émises sur les performances des systèmes agricoles est limité par le fait que leurs performances ont été évaluées en prenant en compte une variabilité spatio-temporelle restreinte. A l'échelle des systèmes de production, l'évaluation économique que nous avons conduite repose sur une campagne agricole unique (chapitre 3). Son domaine de validité est de ce fait limité par l'absence de prise en compte d'évènements dont on a identifié l'existence mais dont la fréquence n'est pas connue, comme par exemple une surmortalité du cheptel liée aux températures et à des épisodes épidémiques, ou encore un besoin en trésorerie spécifique du fait d'évènements familiaux ponctuels. Cette évaluation économique ne prend pas non plus en compte la variabilité interannuelle et spatiale des prix dans le double contexte d'un marché non régulé et très fortement évolutif (doublement des prix de la main d'œuvre agricole en l'espace de 5 ans, inflation variant de 8 à 30 % selon les années entre 2008 et 2012).

A l'échelle des systèmes de culture, nous avons limité l'analyse régionale des performances des systèmes de culture conventionnels (chapitre 3) à une année spécifique, dont on ignore la représentativité eu égard à la variabilité des facteurs de milieu. Les aspects de risque, dont on sait qu'ils sont primordiaux pour de petits agriculteurs familiaux (Janssen and van Ittersum, 2007) sont de ce fait exclus de l'analyse.

L'analyse comparée des performances des systèmes de culture à partir de données collectées sur des sites de démonstration-formation (chapitre 4) repose de son côté sur (i) trois sites aux caractéristiques très spécifiques eu égard à la forte variabilité des conditions de milieu en zone de montagne du Nord Vietnam et (ii) trois séquences spécifiques de deux années climatiques, sans que l'on connaisse la gamme de variation des conditions biophysiques ni l'occurrence des situations extrêmes que les agriculteurs sont susceptibles de rencontrer en phase de conversion vers l'agriculture de conservation.

Enfin, les conclusions tirées quant à la comparaison de l'attractivité économique des systèmes de culture en agriculture de conservation et en agriculture conventionnelle ont une validité limitée au contexte économique extrants / intrants qui a été étudié.

La perspective née de ce constat est celle de la nécessité d'intégrer la variabilité dans l'évaluation des performances des systèmes agricoles, ceci pour d'une part explorer le comportement des acteurs face au risque et d'autre part explorer la robustesse des résultats obtenus selon les variations possibles de contexte biophysique et économique. Dans cette perspective, l'évaluation des performances des systèmes agricoles nécessiterait d'être complétée par le développement de modèles de culture *ad-hoc* (Affholder et al., 2012) qui correspondent à des modèles d'ingénieurs visant à répondre aux questions et problèmes spécifiques se posant dans un contexte donné. Une question importante à cet égard est de déterminer dans quelle mesure, sous quelles conditions et au bout de combien temps l'agriculture de conservation est susceptible de tamponner (réduire) la variabilité des performances agronomiques et économiques des systèmes de culture.

3.5. Intégrer les indicateurs mobilisés à différentes échelles spatiales et temporelles en incluant des seuils de faisabilité et d'optimalité et en construire une représentation partagée

3.5.1. Construire une représentation partagée des indicateurs

Nous nous sommes placés dans le cadre d'une évaluation technico-économique de systèmes de culture contenant une part d'évaluation environnementale et menée simultanément à la phase de conception.
Evaluer des systèmes de culture alternatifs dès la phase de conception permet *a priori* d'augmenter les chances qu'ils soient efficaces (adéquation avec les objectifs de durabilité recherchés) et adoptables (adéquation avec les objectifs et contraintes des agriculteurs). Dans ce cadre, nous avons dérivé des indicateurs de performances des systèmes de culture en considérant différents attributs et critères de la durabilité des systèmes. Les indicateurs mobilisés ont été construit à dire d'expert, dans une perspective d'ingénierie avec le parti pris délibéré d'une absence de co-construction ou validation participative. Ce travail n'occulte pas pour autant la nécessité de construire une représentation partagée des indicateurs entre acteurs dans une phase d'évaluation – prototypage – diffusion, nécessitant en particulier la mise à jour du poids relatif des indicateurs et de leur seuil de signification selon les acteurs.

3.5.2. Intégrer des plages de signification pour interpréter les mesures associées aux indicateurs retenus

Dans l'analyse de la diversité des systèmes de culture conventionnels (chapitre 3), nous avons cherché à comparer la mesure des indicateurs mobilisés à des seuils de pression et d'impact (i.e. seuils à partir desquels les situations pouvaient être considérées comme critiques au plan de la durabilité) qui soient signifiants (i.e. qui aient une signification pour les acteurs engagés dans le pilotage de la durabilité des systèmes). Ces seuils ont été déterminés de façon bibliographique avec des niveaux de preuve variables. Cette approche aurait pu utilement être complétée par la détermination de seuils à dire d'acteurs. Il peut par ailleurs être observé que la notion de « seuil d'impact signifiant » aurait pu également être complétée par celle de « plage de signification », proposant, pour un indicateur donné, une gamme de valeurs incluant en particulier le faisable, l'optimal, et les extrêmes (Nevens et al., 2006).

3.5.3. Analyser ex-ante l'impact environnemental de pratiques agricoles en cours de conception à des échelles supérieures à l'exploitation

La mobilisation d'indicateurs de pression environnementale basés sur les pratiques (chapitre 3) permet de donner des indices quant aux impacts environnementaux probables à des échelles supérieures, sans en offrir une mesure directe, ce qui s'est révélé bien adapté aux objectifs recherchés dans ce cadre.
Des indicateurs d'impact environnemental[7] mériteraient néanmoins d'être intégrés à l'évaluation à court terme des performances de l'agriculture de conservation pour compléter l'analyse agro-économique qui en a été faite.

[7] La comparaison d'impact environnemental de l'agriculture de conservation et de l'agriculture conventionnelle nécessiterait toutefois de pouvoir discriminer finement l'effet des différentes pratiques sur les risques d'érosion, d'eutrophisation et de pollution selon que celles-ci soit réalisées sur sol nu ou sur couvert végétal.

Les indicateurs mobilisés pour l'analyse des systèmes de culture ont toutefois été exprimés à l'échelle limitée de la parcelle cultivée. En l'absence d'une intégration des tendances observées aux échelles exploitation / territoire, ceci limite la portée des conclusions émises, à cette seule échelle. Ceci pose également la question de la signification des résultats obtenus notamment en matière de durabilité, et des indicateurs mobilisés, à d'autres échelles d'analyse (Riley, 2001).
L'évaluation menée simultanément à la conception s'opère classiquement aux échelles de conception (parcelle cultivée et de façon associée, exploitation). Pour les critères de durabilité dont l'évaluation fait nécessairement référence à des échelles plus larges (impact environnemental des systèmes de culture par exemple), il y a un écart à combler entre l'évaluation opérée aux échelles parcelle/exploitation et les possibilités d'une évaluation menée à l'échelle du territoire dès la phase de conception (van Ittersum et al., 2008). Les tentatives en ce sens sont peu nombreuses. Combler l'écart entre analyse micro et macro suppose une démarche *ex-ante* intégrant les échelles spatiales et temporelles (absence d'impact mesurable de systèmes en cours de conception et donc non diffusés dans le contexte) ainsi que le recours à la modélisation (van Ittersum et al., 2008). Ceci implique aussi la formalisation d'une démarche de changement d'échelle (spatiale et temporelle) explicite quant à l'intégration des indicateurs calculés aux échelles micro en prenant en compte (i) la représentativité des échelles inférieures par rapport aux échelles supérieures et (ii) les processus et interactions spécifiques entre les différents sous-systèmes de l'échelle macro envisagée, (iii) supposant eux-mêmes le recours à des indicateurs spécifiques d'impact ou de pression à cette échelle. La question reste toutefois posée de déterminer dans quelle mesure il est réellement envisageable d'intégrer dans une phase de conception-évaluation centrée sur la parcelle et l'exploitation des échelles spatiales et temporelles d'analyse nécessairement supérieures.

3.6. Coupler expérimentation et modélisation dans l'évaluation des systèmes

Les données utilisées dans ce travail ont été collectées sur des matrices de création-diffusion conçues dans une optique de développement et comprenant une gamme large de systèmes de culture à différents niveaux d'intensification. La mise en place de dispositifs matriciels « on-farm » de création-formation-diffusion au sein de projets de développement agronomique répond à un ensemble d'objectifs :

- Prototypage *in situ* de systèmes de culture combinant conception *de novo* (systèmes en rupture) et pas à pas (adaptation progressive) ;
- Démonstration simultanée des prototypes générés à dire d'expert ;
- Formation des paysans, chercheurs et techniciens au pilotage technique des systèmes proposés ;
- Evaluation *in-situ* visant à générer des hypothèses locales sur le fonctionnement et les performances des systèmes de culture

La valorisation scientifique de tels dispositifs apparait aujourd'hui faible que ce soit en termes (i) d'analyse des processus à l'origine des performances des systèmes de culture comme (ii) d'évaluation robuste des performances agronomiques, économiques et environnementales de systèmes de culture par rapport à la variabilité des options et des contextes.
Ce type de dispositifs dispose pourtant d'un certain nombre d'atouts. Tout d'abord, ils sont installés en milieu paysan dans une perspective allant du moyen terme (durée de vie d'un projet) au long terme. Ils mettent en démonstration une gamme de systèmes de culture de rupture à différents niveaux d'intensification. Les données qui y sont récoltées en routine permettent de construire des indicateurs de performance agro-économique pertinents pour l'évaluation de l'attractivité des systèmes.

Ils sont généralement répliqués dans des milieux biophysiques et socioéconomiques différenciés, recoupant ainsi une certaine diversité de milieux agraires et de conditions agricoles, ce qu'il n'est pas toujours possible de réaliser avec les contraintes financières associées aux budgets de la recherche agronomique publique, en particulier au Sud.
Pour autant, la conception de tels dispositifs est soumise à un ensemble de contraintes opérationnelles, en particulier (i) la disponibilité du foncier, critique dans des espaces ruraux saturés, (ii) la faisabilité du pilotage par les ressources humaines qui y sont affectées et (iii) le maintien d'une perspective de démonstration requérant la possibilité de percevoir visuellement les différences entre les systèmes mis en comparaison, ce qui peut s'avérer limitant eu égard aux faibles possibilités de randomisation.
L'étude de cas que nous avons conduite montre que ces contraintes opérationnelles peuvent être fortement limitantes pour obtenir des données scientifiquement exploitables à partir d'outils d'exploration statistique classique. Il peut par ailleurs être relevé (i) le faible niveau de valorisation scientifique de la diversité d'options et de contextes testés et (ii) les limites au domaine de validité des résultats obtenus, dont la représentativité est restreinte aux séquences climatiques et conditions biophysiques spécifiquement observées. On est donc dans un compromis délicat entre objectifs de développement (création - démonstration prospective d'une gamme large d'options dans une optique de développement rural) et de recherche (évaluation scientifiquement valide (i) de la compréhension du fonctionnement des systèmes et (ii) de leurs performances agronomiques et économiques sous différents scénarios d'évolution des contextes et options). Il est cependant indispensable d'améliorer la valorisation scientifique de tels dispositifs compte-tenu des coûts significatifs associés à leur mise en place et à leur suivi.

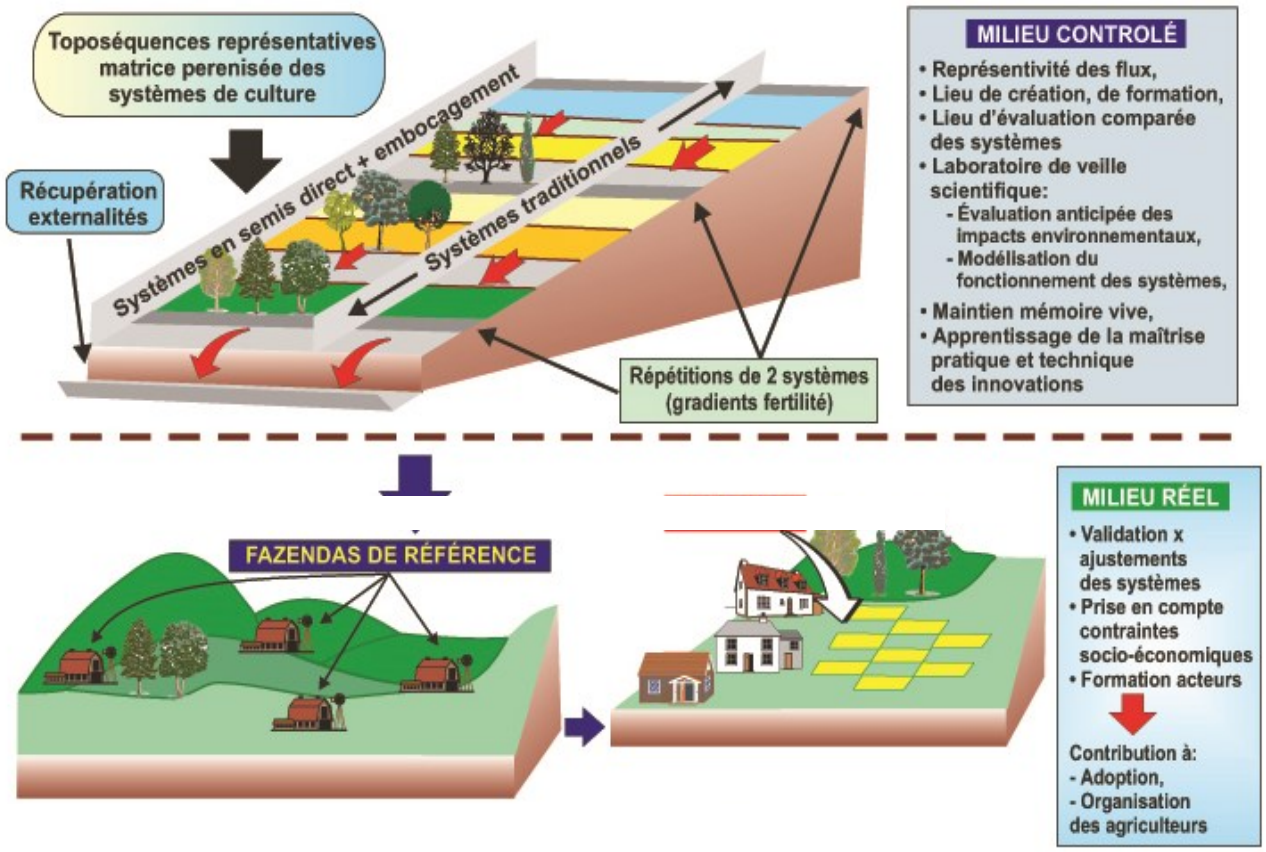
Les perspectives d'amélioration de ces dispositifs pour en faciliter l'analyse statistique peuvent tout d'abord être considérées comme limitées. En effet, la randomisation et la réplication large *in situ* (i.e. au sein de ces dispositifs de démonstration) des systèmes de culture mis en démonstration sont difficiles à envisager sans :

(i) compromettre un objectif sous-jacent (c'est à dire réduire la gamme de systèmes ou de niveaux d'intensification testés) et limiter la possibilité d'appréhender visuellement des différences entre systèmes ;
(ii) compromettre la faisabilité opérationnelle de la conduite technique des systèmes -par exemple gestion des brûlis sur les parcelles témoins-, en particulier dans des situations avec de forts gradients de milieu (pente…) accroissant les risques de transferts verticaux (fertilisation, biomasse…) ;
(iii) compromettre la faisabilité opérationnelle de la gestion de tels sites avec des moyens humains et financiers significatifs mais néanmoins limités.

Le coût et les contraintes de gestion de tels dispositifs ne permettent pas d'envisager de les répéter largement.
La réplication *ex-situ* des systèmes testés *(*i.e. par l'installation de parcelles couples en milieu paysan ou fermes de référence) a été historiquement envisagée au Brésil (Séguy et al., 2001; Seguy L., 1996) (Figure V-1).
Toutefois, et bien qu'envisageables, ces répétitions *ex-situ* sont fortement contraintes dans des contextes d'agriculture familiale au Sud par les difficultés[8] à proposer à de petits paysans de tester des systèmes de culture en cours de prototypage et qui n'ont pas encore fait la preuve de leurs performances agronomiques et économiques.

[8] Il peut être relevé que les difficultés d'installation de parcelles couples constituent pour l'agronome un indice sinon un indicateur *a priori* de l'attractivité immédiate des systèmes mis en démonstration.

Figure V-1 Insertion historique de dispositifs matriciels de conception-démonstration-formation dans une démarche globale de recherche développement selon Séguy et al. (1996, 2001)



Source : Séguy et al., 1996, 2001.

Les dispositifs de création-diffusion tels que ceux mobilisés ici permettent de contribuer à la mise au point de prototypes de systèmes de culture par expérimentation. Cependant, ils ne permettent pas intrinsèquement d'explorer la variabilité des performances de ces prototypes en fonction de scénarios économiques, biophysiques et techniques, ce qu'autorise la modélisation. Le développement de modèles bioéconomiques de ferme est susceptible d'apporter des informations complémentaires au diagnostic des contraintes et objectifs ainsi qu'à l'expérimentation pour guider le prototypage de systèmes de culture.

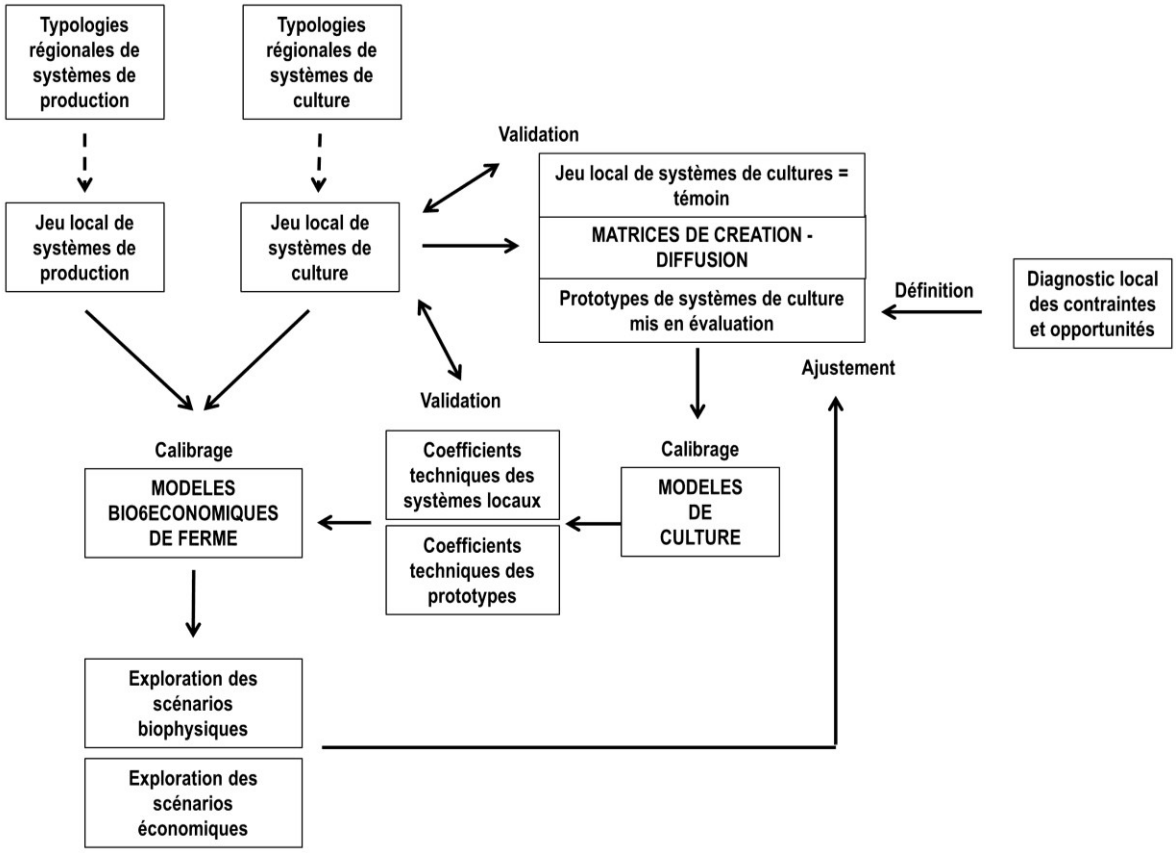
Ces modèles de fermes nécessitent la mesure de coefficients techniques (inputs / outputs) issus du terrain. Ces coefficients techniques sont susceptibles d'être inférés de tels dispositifs, à la fois par mesure directe (temps de travaux, coûts de production) et par couplage avec des modèles de culture (sous réserve toutefois de la capacité de tels modèles de culture à reproduire le comportement de systèmes de culture complexes dans le temps et dans l'espace).

Ceci suggère une forte complémentarité entre les deux approches qui a pour implication principale la nécessité de coupler, autant que faire se peut, modélisation et expérimentation dans l'évaluation de l'attractivité à court terme de prototypes d'innovations techniques de rupture.

C'est dans ce domaine du couplage à des modèles bioéconomiques de ferme dont les coefficients techniques seraient issus de modèles de culture (Figure V-1) que les perspectives d'amélioration de l'utilité scientifique de ce type de dispositifs nous semble les plus importantes pour :

- (i) l'analyse des processus sous-jacents aux performances agro-économiques des systèmes de culture mis en démonstration,
- (ii) l'exploration des performances agronomiques des systèmes mis en démonstration sous différents scénarios de variation des conditions biophysiques, par la mobilisation de modèles de simulation des systèmes de culture
- (iii) l'exploration de l'attractivité économique des systèmes mis en démonstration pour différents types de systèmes de production, en intégrant différents niveaux de risque agronomique et économique,
- (iv) l'utilisation en retour des informations issues de la modélisation (dynamiques de performances agronomiques selon les variations de contexte biophysique, attractivité économique *ex-ante* des systèmes pour différents types de fermes et différents horizons de décision) pour guider la conception des prototypes de systèmes de culture en complément des informations issues du diagnostic agraire et/ou d'un diagnostic agronomique régional (Dore et al., 2008; Dore et al., 1997)

Figure V-2 Perspective d'utilisation de dispositifs matriciels de creation-formation-diffusion dans une démarche de couplage à des modèles de ferme et de culture



L'obtention des données biophysiques nécessaires d'une part au calibrage de tels modèles de culture (calcul et ajustement des paramètres) et d'autre part à l'évaluation de leur valeur prédictive peut supposer la réalisation d'un certain nombre de mesures complémentaires au sein de ces dispositifs.

Ceci implique d'abord la collecte de variables intermédiaires en cours de cycle cultural (suivi de l'évolution des états de milieu (humidité du sol, bilans minéraux, etc.) et de l'état du peuplement cultivé (LAI) en complément des paramètres d'élaboration du rendement).
Ceci peut également impliquer une instrumentation complémentaire pour évaluer la valeur prédictive des modèles utilisés (bilans hydriques, et minéraux par exemple).
Le développement de modèles de ferme nécessite par ailleurs la définition des systèmes de production à prendre en considération, qui suppose, sinon un affinage local des typologies de systèmes de production réalisées à une échelle régionale, du moins la sélection d'un jeu local d'exploitations représentatives des types définis régionalement.

3.7. Evaluer la contribution des dispositifs de création diffusion aux processus sociotechniques d'innovation locale

Dans une toute autre perspective, les dispositifs matriciels de création-formation-diffusion peuvent être vus à la fois comme un objet participant aux processus d'innovation locale et comme un projet d'agriculture.
Ils génèrent des interactions sociotechniques au sein du village, mais également entre acteurs locaux et acteurs exogènes (techniciens, chercheurs, experts, décideurs) ainsi d'ailleurs qu'entre seuls acteurs exogènes.
Ces dispositifs mettent en débat une vision prospective de l'agriculture fondée sur un ensemble d'options techniques conçues pour améliorer la durabilité des agroécosystèmes tout en se voulant en phase avec les contraintes court-terme des paysans et les opportunités économiques existantes ou projetées. A ce titre, ce type de dispositifs génèrent divers types d'enjeux autour desquels se structurent des jeux stratégiques d'acteurs (Bako-Arifari and Le Meur, 2001) au sein d'arènes villageoises (Dartigues, 2001). Ils participent en particulier à la recomposition de collectifs originaux associant agriculteurs et acteurs de la recherche et du développement autour de pratiques innovantes (Goulet, 2008). Une perspective scientifique associée est l'évaluation de la contribution de tels dispositifs aux processus locaux d'innovation autour de l'agriculture de conservation, incluant les aspects institutionnels (au plan de la structuration des acteurs) et techniques (ajustement local des principes de l'agriculture de conservation mis en démonstration au sein de ces sites).

Références bibliographiques

Affholder F. (2001) Modélisation de culture et diagnostic agronomique régional. Mise au point d'une méthode et application au cas du maïs chez les petits producteurs du Brésil Central. Agronomie. INA-PG, Paris, p 246.

Affholder F, Jourdain D, Quang DD, Tuong TP, Morize M, Ricome A. (2010) Constraints to farmers' adoption of direct-seeding mulch-based cropping systems: A farm scale modeling approach applied to the mountainous slopes of Vietnam. Agricultural Systems 103: 51-62.

Affholder F, Poeydebat C, Corbeels M, Scopel E, Tittonell P. (2013) The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. Field Crops Research 143: 106-118.

Affholder F, Tittonell P, Corbeels M, Roux S, Motisi N, Tixier P, Wery J. (2012) Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? Agron J 104: 735-748.

Alauddin M, Quiggin J. (2008) Agricultural intensification, irrigation and the environment in South Asia: Issues and policy options. Ecological Economics 65: 111-124.

Alther C, Castella J-C, Novosad P, Rousseau E, Hieu TT. (2002) Impact of accessibility on the range of livelihood options available to farm households in mountainous areas of northern Vietnam. Doi Moi in the Mountains: Land use changes and farmers' livelihood strategies in Bac Kan Province, Vietnam Hanoi, Vietnam: The Agricultural Publishing House: 121-146.

Antle JM, Stoorvogel JJ, Valdivia RO. (2006) Multiple equilibria, soil conservation investments, and the resilience of agricultural systems. Environment and Development Economics 11: 477-492.

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

Bako-Arifari N, Le Meur P-Y. (2001) Une anthropologie sociale des dispositifs de développement. L'évaluation des politiques de développement Approches pluri-disciplinaires, Jean-François Baré (dir), Paris, L'Harmattan : 121-173.

Baldé AB, Scopel E, Affholder F, Corbeels M, Da Silva FAM, Xavier JHV, Wery J. (2011) Agronomic performance of no-tillage relay intercropping with maize under smallholder conditions in Central Brazil. Field Crops Research 124: 240-251.

Barrabe A, Rapidel B, Sissoko F, Traord B, Wery J. (2007) Elaboration and test of a decision rule for the application of mepiquat chloride on cotton in Mali. European Journal of Agronomy 27: 197-204.

Baudron F, Andersson JA, Corbeels M, Giller KE. (2012) Failing to Yield? Ploughs, Conservation Agriculture and the Problem of Agricultural Intensification: An Example from the Zambezi Valley, Zimbabwe. The Journal of Development Studies 48: 393-412.

Bergez JE, Colbach N, Crespo O, Garcia F, Jeuffroy MH, Justes E, Loyce C, Munier-Jolain N, Sadok W. (2010) Designing crop management systems by simulation. European Journal of Agronomy 32: 3-9.

Blazy JM, Dorel M, Salmon F, Ozier-Lafontaine H, Wery J, Tixier P. (2009a) Model-based assessment of technological innovation in banana cropping systems contextualized by farm types in Guadeloupe. European Journal of Agronomy 31: 10-19.

Blazy JM, Ozier-Lafontaine H, Dore T, Thomas A, Wery J. (2009b) A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. Agricultural Systems 101: 30-41.

Blazy JM, Tixier P, Thomas A, Ozier-Lafontaine H, Salmon F, Wery J. (2010) BANAD: A farm model for ex ante assessment of agro-ecological innovations and its application to banana farms in Guadeloupe. Agricultural Systems 103: 221-232.

Bockstaller C, Guichard L, Keichinger O, Girardin P, Galan MB, Gaillard G. (2009) Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. Agron Sustain Dev 29: 223-235.

Bockstaller C, Guichard L, Makowski D, Aveline A, Girardin P, Plantureux S. (2008) Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. Agron Sustain Dev 28: 139-149.

Boulakia S, Chabierski S, Kou P, San S, Kong R, Leng V, Sar V, Chhit K, Séguy L. (2012) Adaptation of direct-seeding mulch-based cropping systems for annual cash crop production in Cambodian rainfed uplands. Hauswirth D, Pham TS, Nicetic O, Tivet F, Le Quoc D, Van de Fliert E, Kirchhof, G, Boulakia S, Chabierski S, Husson O, Chabanne A, Boyer J, Autfray P, Lienhard P, Legoupil J-C, Stevens M L (eds) 2012 Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes - Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia Held in Hanoi, Vietnam, 10th-15th December 2012 CIRAD, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Viet Nam; University of Queensland, Brisbane, Australia 372 p.

Bradshaw DKaB. (2006) Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. Food Policy 32 (2007) 25–4.

Brossier J. (1987) Système et système de production. Cahiers des sciences humaines 23.

Casanova D, Goudriaan J, Bouma J, Epema GF. (1999) Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. Geoderma 91: 191-216.

Castella J-C. (2012) Agrarian transition and farming system dynamics in the uplands of South-East Asia. Hauswirth D, Pham TS, Nicetic O, Tivet F, Le Quoc D, Van de Fliert E, Kirchhof, G, Boulakia S, Chabierski S, Husson O, Chabanne A, Boyer J, Autfray P, Lienhard P, Legoupil J-C, Stevens M L (eds) 2012 Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes - Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia Held in Hanoi, Vietnam, 10th-15th December 2012 CIRAD, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Viet Nam; University of Queensland, Brisbane, Australia 372 p.

Castella J-C, Jobard E, Lestrelin G, Nanthavong K, Lienhard P. (2012) Maize expansion in Xieng Khouang province, Laos: what prospects for conservation agriculture? Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes - Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia Held in Hanoi, Vietnam, 10th-15th December 2012 CIRAD, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Viet Nam; University of Queensland, Brisbane, Australia 372 p: 372.

Castella JC, Manh PH, Kam SP, Villano L, Tronche NR. (2005) Analysis of village accessibility and its impact on land use dynamics in a mountainous province of northern Vietnam. Applied Geography 25: 308-326.

Castoldi N, Bechini L. (2010) Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. European Journal of Agronomy 32: 59-72.

Chauveau J-P. (1995) Farmers strategies: the history and utility of a multi disciplinary concept in Francophone development studies. The rural extension bulletin 7: 24 28.

Chivenge PP, Murwira HK, Giller KE, Mapfumo P, Six J. (2007) Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils. Soil and Tillage Research 94: 328-337.

Clemens G, Fiedler S, Cong ND, Van Dung N, Schuler U, Stahr K. (2010) Soil fertility affected by land use history, relief position, and parent material under a tropical climate in NW-Vietnam. Catena 81: 87-96.

Clement FC. (2008) A multi-level analysis of forest policies in Northern Vietnam: Uplands, people, institutions and discourses. Newcastle University.

Cloquell-Ballester VA, Cloquell-Ballester VA, Monterde-Diaz R, Santamarina-Siurana MC. (2006) Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. Environmental Impact Assessment Review 26: 79-105.

Coquil X, Fiorelli J-L, Blouet A, Trommenschlager J-M, Bazard C, Mignolet C. (2011) Conception de systèmes de polyculture élevage laitiers en agriculture biologique : Synthèse de la démarche pas à pas centrée sur le dispositif expérimental INRA ASTER-Mirecourt. Rencontres Recherche Ruminants, 18ème journée.

Corsi S, Friedrich T, Kassam A, Pisante M, Sà JdM. (2012) Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: a literature review. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Costard S, Porphyre V, Messad S, Rakotondrahanta S, Vidon H, Roger F, Pfeiffer DU. (2009) Multivariate analysis of management and biosecurity practices in smallholder pig farms in Madagascar. Preventive Veterinary Medicine 92: 199-209.

Daam MA, Van den Brink PJ. (2010) Implications of differences between temperate and tropical freshwater ecosystems for the ecological risk assessment of pesticides. Ecotoxicology 19: 24-37.

Dartigues L. (2001) La notion d'arène. Intérêts pour la recherche en anthropologie politique. DEA, Ehess/Shadyc, 1996.

Das R, Bauer S. (2012) Bio-economic analysis of soil conservation technologies in the mid-hill region of Nepal. Soil and Tillage Research 121: 38-48.

de Sardan J-PO. (1995) Anthropologie et développement: essai en socio-anthropologie du changement social. KARTHALA Editions.

Debaeke P, Munier-Jolain N, Bertrand M, Guichard L, Nolot JM, Faloya V, Saulas P. (2009) Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. Agron Sustain Dev 29: 73-86.

Delmotte S, Tittonell P, Mouret JC, Hammond R, Lopez-Ridaura S. (2011) On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. European Journal of Agronomy 35: 223-236.

Derpsch R, Friedrich T, Kassam A, Hongwen L. (2010) Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 3: 1-25.

Derpsch R, Sidiras N, Roth CH. (1986) Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. Soil and Tillage Research 8: 253-263.

Dixon JA, Gibbon DP, Gulliver A. (2001) Farming systems and poverty: improving farmers' livelihoods in a changing world. FAO.

Dogliotti S, Rossing WAH, van Ittersum MK. (2003) ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. European Journal of Agronomy 19: 239-250.

Dogliotti S, Rossing WAH, van Ittersum MK. (2004) Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay. Agricultural Systems 80: 277-302.

Dogliotti S, van Ittersum MK, Rossing WAH. (2005) A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. Agricultural Systems 86: 29-51.

Dore T, Clermont-Dauphin C, Crozat Y, David C, Jeuffroy MH, Loyce C, Makowski D, Malézieux E, Meynard JM, Valentin-Morison M. (2008) Methodological progress in on-farm regional diagnosis. A review. Agron Sustain Dev 28.

Dore T, Makowski D, Malezieux E, Munier-Jolain N, Tchamitchian M, Tittonell P. (2011) Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. European Journal of Agronomy 34: 197-210.

Dore T, Sebillotte M, Meynard JM. (1997) A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. Agricultural Systems 54: 169-188.

Dorin B, Paillard S, Dorin B, Paillard S, B. D, et al. (2009) Agrimonde - Agricultures et alimentation du monde en 2050. SFER Nourrir le monde et préserver l''environnement.

Dounias I, Aubry C, Capillon A. (2002) Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. Agricultural Systems 73: 233-260.

Dury J, Garcia F, Reynaud A, Therond O, Bergez J. (2010) Modelling the Complexity of the Cropping Plan Decision-making. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting, Ottawa, Canada David A Swayne, Wanhong Yang, A A Voinov, A Rizzoli, T Filatova (Eds)

Erenstein O. (2003) Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. Agriculture, Ecosystems & Environment 100: 17-37.

Erenstein O. (2006) Intensification or extensification? Factors affecting technology use in peri-urban lowlands along an agro-ecological gradient in West Africa. Agricultural Systems 90: 132-158.

FA0. (2008) http://www.fao.org/ag/ca/.

Fangueiro D, Pereira J, Coutinho J, Moreira N, Trindade H. (2008) NPK farm-gate nutrient balances in dairy farms from Northwest Portugal. European Journal of Agronomy 28: 625-634.

FAO. (2002) Agriculture mondiale : horizon 2015/2030.

Fermont AM, van Asten PJA, Tittonell P, van Wijk MT, Giller KE. (2009) Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. Field Crops Research 112: 24-36.

Gates S. (2002) Review of methodology of quantitative reviews using meta-analysis in ecology. JO - Journal of Animal Ecology.

Giller KE, Corbeels M, Nyamangara J, Triomphe B, Affholder F, Scopel E, Tittonell P. (2011) A research agenda to explore the role of conservation agriculture in African smallholder farming systems. Field Crops Research 124: 468-472.

Giller KE, Witter E, Corbeels M, Tittonell P. (2009) Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. Field Crops Research 114: 23-34.

Girard N. (2006) Catégoriser les pratiques d'agriculteurs pour reformuler un problème en partenariat Une proposition méthodologique. Cahiers Agricultures 15: 261-272.

Girard N, Duru M, Hazard L, Magda D. (2008) Categorising farming practices to design sustainable land-use management in mountain areas. Agron Sustain Dev 28: 333-343.

Girardin P, Bockstaller C, Werf HVd. (1999) Indicators: Tools to Evaluate the Environmental Impacts of Farming Systems. Journal of Sustainable Agriculture 13: 5-21.

Goulet F. (2008) L'innovation par retrait: recomposition des collectifs sociotechniques et de la nature dans le développement de techniques culturales sans labour. Thèse de doctorat, université Pierre Mendès France, Grenoble.

Gregory PJ, Ingram JSI, Andersson R, Betts RA, Brovkin V, Chase TN, Grace PR, Gray AJ, Hamilton N, Hardy TB, Howden SM, Jenkins A, Meybeck M, Olsson M, Ortiz-Monasterio I, Palm CA, Payn TW, Rummukainen M, Schulze RE, Thiem M, Valentin C, Wilkinson MJ. (2002) Environmental consequences of alternative practices for intensifying crop production. Agriculture, Ecosystems & Environment 88: 279-290.

Greiner R, Patterson L, Miller O. (2009) Motivations, risk perceptions and adoption of conservation practices by farmers. Agricultural Systems 99: 86-104.

Guto SN, de Ridder N, Giller KE, Pypers P, Vanlauwe B. (2012) Minimum tillage and vegetative barrier effects on crop yields in relation to soil water content in the Central Kenya highlands. Field Crops Research 132: 129-138.

Hahn SK. (1995) Technologies for sustainable agriculture in the tropics: John Ragland and Rattan Lal (Editors), ASA Special Publication No. 58, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, 1993, 313 pp., US$30, ISBN 0-89118-118-0. Agriculture, Ecosystems & Environment 56: 63-65.

Hauswirth D, Kong R, Gramond F, Jourdain D, Affholder F, Quang DD, Wery J, Tittonell P. (2012) Assessing agricultural sustainability of current farming systems to guide alternative management strategies: a case study in the highlands of Vietnam. Conservation Agriculture and Sustainable Upland Livelihoods Innovations for, with and by Farmers to Adapt to Local and Global Changes - Proceedings of the 3rd International Conference on Conservation Agriculture in Southeast Asia Held in Hanoi, Vietnam, 10th-15th December 2012 CIRAD, Montpellier, France; NOMAFSI, Phu Tho, Viet Nam; University of Queensland, Brisbane, Australia 372 p: 372.

Hoang LA, Castella JC, Novosad P. (2006) Social networks and information access: Implications for agricultural extension in a rice farming community in northern Vietnam. Agric Human Values 23: 513-527.

Janssen S, Louhichi K, Kanellopoulos A, Zander P, Flichman G, Hengsdijk H, Meuter E, Andersen E, Belhouchette H, Blanco M, Borkowski N, Heckelei T, Hecker M, Li HT, Lansink AO, Stokstad G, Thorne P, van Keulen H, van Ittersum MK. (2010) A Generic Bio-Economic Farm Model for Environmental and Economic Assessment of Agricultural Systems. Environ Manage 46: 862-877.

Janssen S, van Ittersum MK. (2007) Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. Agricultural Systems 94: 622-636.

Jiang P, Thelen K. (2004) Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn–soybean cropping system. Agron J 96: 252-258.

Jourdain D, Quang D, Van Cuong T, Jamin J. (2011) Différenciation des exploitations agricoles dans les montagnes du Nord du Vietnam: le rôle clé de l'accès à l'eau?= Farm household differentiation in upper-catchments of Northern Vietnam: The key role of access to water?

Jouve P. (1992) Le diagnostic du milieu rural. De la région à la parcelle. . Etudes et travaux du CNEARC, n°6, Montpellier, 40 p.

Jouve P. (2006) La dimension spatiale des systèmes de culture: comparaison entre agriculture tempérée et agriculture tropicale. Cahiers Agricultures 15: 255-260.

Kassam A, Friedrich T, Derpsch R, Lahmar R, Mrabet R, Basch G, González-Sánchez EJ, Serraj R. (2012) Conservation agriculture in the dry Mediterranean climate. Field Crops Research 132: 7-17.

Kassam A, Friedrich T, Shaxson F, Pretty J. (2009) The spread of Conservation Agriculture: justification, sustainability and uptake. International Journal of Agricultural Sustainability 7: 292-320.

Keys E, McConnell WJ. (2005) Global change and the intensification of agriculture in the tropics. Global Environmental Change 15: 320-337.

Kienzler KM, Lamers JPA, McDonald A, Mirzabaev A, Ibragimov N, Egamberdiev O, Ruzibaev E, Akramkhanov A. (2012) Conservation agriculture in Central Asia—What do we know and where do we go from here? Field Crops Research 132: 95-105.

Knowler D, Bradshaw B. (2007) Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. Food Policy 32: 25-48.

Köbrich C, Rehman T, Khan M. (2003) Typification of farming systems for constructing representative farm models: two illustrations of the application of multi-variate analyses in Chile and Pakistan. Agricultural Systems 76: 141-157.

Kostrowicki J. (1977) Agricultural typology concept and method. Agricultural Systems 2: 33-45.

Kumar K, Goh KM. (1999) Crop Residues and Management Practices: Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield, and Nitrogen Recovery. In: Donald LS (ed) Advances in Agronomy. Academic Press, pp 197-319.

Ladha JK, Pathak H, J. Krupnik T, Six J, van Kessel C. (2005) Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. In: Donald LS (ed) Advances in Agronomy. Academic Press, pp 85-156.

Lafond G, McConkey BG, Stumborg M. (2009) Conservation tillage models for small-scale farming: Linking the Canadian experience to the small farms of Inner Mongolia Autonomous Region in China. Soil and Tillage Research 104: 150-155.

Lal R, Reicosky DC, Hanson JD. (2007) Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. Soil and Tillage Research 93: 1-12.

Lançon J, Wery J, Rapidel B, Angokaye M, Gerardeaux E, Gaborel C, Ballo D, Fadegnon B. (2007) An improved methodology for integrated crop management systems. Agron Sustain Dev 27: 101-110.

Landais E. (1998) Modelling farm diversity: new approaches to typology building in France. Agricultural Systems 58: 505-527.

Le Bellec F, Cattan P, Bonin M, Rajaud A. (2011) Building a typology of cropping practices from comparison with a technical reference: first step for a relevant cropping system redesigning process – results for tropical citrus production. Fruits 66: 143-159.

Le Gal PY, Dugué P, Faure G, Novak S. (2011) How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. Agricultural Systems 104: 714-728.

Lebacq T, Baret P, Stilmant D. (2013) Sustainability indicators for livestock farming. A review. Agron Sustain Dev 33: 311-327.

Lei X, Peng C, Tian D, Sun J. (2007) Meta-analysis and its application in global change research. CHINESE SCI BULL 52: 289-302.

Lestrelin G, Nanthavong K, Jobard E, Keophoxay A, Lienhard P, Khambanseuang C, Castella J-C. (2012) To till or not to till? The diffusion of conservation agriculture in Xieng Khouang province, Lao PDR Opportunities and constraints. Outlook on Agriculture 41: 41-49.

Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Souchère V, Alberola C, Ménassieu J. (2009) Agronomy for sustainable agriculture. A review. Agron Sustain Dev 29: 1-6.

Lienhard P. (2013) Evaluation agroécologique des systèmes de cultures en zone tropicale humide. Cas de la mise en valeur agricole d'une savane herbacée acide (Plaine des Jarres, Laos). Thèse de doctorat : Sciences de la Terre, INRA/Université de Bourgogne/AgroSup Dijon.

Lienhard P, Panyasiri K, Sayphoummie S, Leudphanane B, Lestrelin G, Séguy L, Tivet F. (2013) Profitability and opportunity of conservation agriculture in acid savannah grasslands of Laos. International Journal of Agricultural Sustainability: 1-16.

Long N. (1990) From paradigm lost to paradigm regained? The case for an actor-oriented sociology of development. Revista Europea de Estudios Latinoamericanos y del Caribe/European Review of Latin American and Caribbean Studies: 3-24.

Long N, Ploeg JDvd. (2008) Demythologizing planned intervention: an actor perspective. Sociologia Ruralis 29: 226-249.

Lopez-Ridaura S, Masera O, Astier M. (2002) Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. the MESMIS framework. . Ecological Indicators 2: 135-148.

Lord Eunice CB, Newell-Price Paul, Smith Ken. (2010) UK Agriculture Nutrient Balances methodology review. Soil Nutrient Balances, draft report. ADAS, Woodthorne, Wergs road, Wolverhampton, WV6 8TQ.

Marohn C, Schreinemachers P, Quang DV, Berger T, Siripalangkanont P, Nguyen TT, Cadisch G. (2012) A software coupling approach to assess low-cost soil conservation strategies for highland agriculture in Vietnam. Environmental Modelling & Software.

Marsh SP, Mac Aulay TG, Hung PV. (2006) Agricultural development and land policy in Vietnam. . ACIAR Monograph No 123, 272p p 18.

Martin C, Castella J-C, Anh HL, Eguienta Y, Hieu TT. (2004) A Participatory Simulation to Facilitate Farmers' Adoption of Livestock Feeding Systems Based on Conservation Agriculture in the Uplands of Northern Vietnam. International Journal of Agricultural Sustainability 2: 118-132.

Mashingaidze N, Madakadze C, Twomlow S, Nyamangara J, Hove L. (2012) Crop yield and weed growth under conservation agriculture in semi-arid Zimbabwe. Soil and Tillage Research 124: 102-110.

Maton L, Leenhardt D, Goulard M, Bergez JE. (2005) Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. Agricultural Systems 86: 293-311.

Merot A, Bergez JE, Capillon A, Wery J. (2008) Analysing farming practices to develop a numerical, operational model of farmers' decision-making processes: An irrigated hay cropping system in France. Agricultural Systems 98: 108-118.

Montagne J. (2008) Contraintes pour l'enchaînement de deux cycles de riz irrigué par an dans les zones de montagne du Nord du Vietnam. Mémoire de master 2 « Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens » UMR System, Supagro Montpellier, Cirad, Montpellier, 26 p.

Nafziger E. (2013) Cropping system In : Illinois Agronomy Handbook. Urbana, Ill :University of Illinois at Urbana-Champaign, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, Dept of Crop Sciences, University of Illinois Extension.

Naudin K. (2012) You can't eat your mulch and have it too : cropping system design and tradeoffs around biomass use for Conservation Agriculture in Cameroon and Madagascar. s.n.], [S.l.

Neumann K, Verburg PH, Stehfest E, Müller C. (2010) The yield gap of global grain production: A spatial analysis. Agricultural Systems 103: 316-326.

Nevens F, Verbruggen I, Reheul D, Hofman G. (2006) Farm gate nitrogen surpluses and nitrogen use efficiency of specialized dairy farms in Flanders: Evolution and future goals. Agricultural Systems 88: 142-155.

Ngwira AR, Aune JB, Mkwinda S. (2012) On-farm evaluation of yield and economic benefit of short term maize legume intercropping systems under conservation agriculture in Malawi. Field Crops Research 132: 149-157.

Nielsen DC, Vigil MF, Benjamin JG. (2011) Evaluating decision rules for dryland rotation crop selection. Field Crops Research In Press, Corrected Proof.

Nyamangara J, Masvaya EN, Tirivavi R, Nyengerai K. (2013a) Effect of hand-hoe based conservation agriculture on soil fertility and maize yield in selected smallholder areas in Zimbabwe. Soil and Tillage Research 126: 19-25.

Nyamangara J, Nyengerai K, Masvaya EN, Tirivavi R, Mashingaidze N, Mupangwa W, Dimes J, Hove L, Twomlow S. (2013b) Effect of conservation agriculture on maize yields in the semi-arid areas of Zimbabwe. Experimental Agriculture FirstView: 1-19.

Ogle SM, Swan A, Paustian K. (2012) No-till management impacts on crop productivity, carbon input and soil carbon sequestration. Agriculture, Ecosystems & Environment 149: 37-49.

Pacini C, Wossink A, Giesen G, Vazzana C, Huirne R. (2003) Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and field-scale analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 95: 273-288.

Papy F. (2008) Le système de culture: un concept riche de sens pour penser le futur. Cahiers Agricultures 17: 263-269.

Payraudeau S, van der Werf HMG. (2005) Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. Agriculture, Ecosystems & Environment 107: 1-19.

Penot E. (2001) Stratégies paysannes et évolution des savoirs : l'hévéaculture agro-forestière indonésienne. Thèse de doctorat Université de Montpellier 1

Perrot C, Landais E. (1993) Exploitations agricoles : pourquoi poursuivre la recherche sur les méthodes typologiques ? Cahiers de la Recherche Développement: 13-23.

Pham Manh C, Zeller M, Birner R, Mueller D. (2003) Improvement of access to available agricultural technologies: did it cause land-use changes and poverty reduction in the North-western upland of Vietnam? Conference on International Agricultural Research for Development. October 8-10/2003.

Rapey H, Lifran R, Valadier A. (2001) Identifying social, economic and technical determinants of silvopastoral practices in temperate uplands: results of a survey in the Massif Central region of France. Agricultural Systems 69: 119-135.

Rapidel B, Traore BS, Sissoko F, Lancon J, Wery J. (2009) Experiment-based prototyping to design and assess cotton management systems in West Africa. Agron Sustain Dev 29: 545-556.

Rasul G, Thapa GB. (2003) Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh. World Dev 31: 1721-1741.

Rasul G, Thapa GB. (2004) Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: an assessment based on environmental, economic and social perspectives. Agr Syst 79: 327-351.

Ribaudo MO BA. (1994) Atrazine: environmental characteristics and economics of management. Agricultural Economic Report 699. Resources and Technology Division, Economic Research Service, US Department of Agriculture.

Ribbens S, Dewulf J, Koenen F, Mintiens K, De Sadeleer L, de Kruif A, Maes D. (2008) A survey on biosecurity and management practices in Belgian pig herds. Preventive Veterinary Medicine 83: 228-241.

Rigby D, Caceres D. (2001) Organic farming and the sustainability of agricultural systems. Agricultural Systems 68: 21-40.

Riley J. (2001) Indicator quality for assessment of impact of multidisciplinary systems. Agric Ecosyst Environ 87: 121-128.

Robinson DT, Brown DG, Parker DC, Schreinemachers P, Janssen MA, Huigen M, Wittmer H, Gotts N, Promburom P, Irwin E, Berger T, Gatzweiler F, Barnaud C. (2007) Comparison of empirical methods for building agent-based models in land use science. Journal of Land Use Science 2: 31-55.

Roel A, Firpo H, Plant RE. (2007) Why do some farmers get higher yields? Multivariate analysis of a group of Uruguayan rice farmers. Computers and Electronics in Agriculture 58: 78-92.

Rusinamhodzi L, Corbeels M, Wijk M, Rufino M, Nyamangara J, Giller K. (2011) A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. Agron Sustain Dev 31: 657-673.

Sakané N, Alvarez M, Becker M, Böhme B, Handa C, Kamiri H, Langensiepen M, Menz G, Misana S, Mogha N, Möseler B, Mwita E, Oyieke H, Wijk M. (2011) Classification, Characterisation, and Use of Small Wetlands in East Africa. Wetlands 31: 1103-1116.

Schuller P, Walling DE, Sepúlveda A, Castillo A, Pino I. (2007) Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using 137Cs measurements. Soil and Tillage Research 94: 183-192.

Scopel E, Da Silva FAM, Corbeels M, Affholder FO, Maraux F. (2004) Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. Agronomie 24: 383-395.

Scopel E, Triomphe B, Affholder F, Silva F, Corbeels M, Xavier J, Lahmar R, Recous S, Bernoux M, Blanchart E, Mendes I, Tourdonnet S. (2013) Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. Agron Sustain Dev 33: 113-130.

Sébillotte M. (1974) Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. Cahiers de l'ORSTOM 24: 3-25.

Séguy L, Bouzinac S, Maronezzi AC. (2001) Systèmes de culture et dynamique de la matière organique. Un dossier du semis direct. CIRAD, Montpellier, France.

Seguy L. BS, Trentini A., Cortes N. A. . (1996) L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. I- La méthode de création-diffusion agricole. II- La gestion de la fertilité par le système de culture. III- Le semis direct, un mode de gestion agrobiologique des sols. . Agriculture et développement 12 : 2-61.

Sena MM, Frighetto RTS, Valarini PJ, Tokeshi H, Poppi RJ. (2002) Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. Soil and Tillage Research 67: 171-181.

Sharma KL, Mandal UK, Srinivas K, Vittal KPR, Mandal B, Grace JK, Ramesh V. (2005) Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. Soil and Tillage Research 83: 246-259.

Shipitalo MJ, Edwards WM. (1998) Runoff and erosion control with conservation tillage and reduced-input practices on cropped watersheds. Soil and Tillage Research 46: 1-12.

Singh P, Aggarwal P, Bhatia V, Murty M, Pala M, Oweis T, Benli B, Rao K, Wani S. (2009) Yield gap analysis: modelling of achievable yields at farm level. Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential: 81.

Steinberg D, Colla P. (1997) CART: classification and regression trees. The Top Ten Algorithms in Data Mining, Chapman & Hall/CRC data mining and knowledge discovery series: 179-201.

Sturz AV, Carter MR, Johnston HW. (1997) A review of plant disease, pathogen interactions and microbial antagonism under conservation tillage in temperate humid agriculture. Soil and Tillage Research 41: 169-189.

Tappan GG, Sall M, Wood EC, Cushing M. (2004) Ecoregions and land cover trends in Senegal. J Arid Environ 59: 427-462.

Thierfelder C, Mwila M, Rusinamhodzi L. (2013) Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: Long-term effects on soil quality and maize productivity. Soil and Tillage Research 126: 246-258.

Thierfelder C, Wall PC. (2009) Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe. Soil and Tillage Research 105: 217-227.

Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature 418: 671-677.

Tittonell P, Muriuki A, Shepherd KD, Mugendi D, Kaizzi KC, Okeyo J, Verchot L, Coe R, Vanlauwe B. (2010) The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa - A typology of smallholder farms. Agricultural Systems 103: 83-97.

Tittonell P, Shepherd KD, Vanlauwe B, Giller KE. (2008a) Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya - An application of classification and regression tree analysis. Agric Ecosyst Environ 123: 137-150.

Tittonell P, Vanlauwe B, Corbeels M, Giller KE. (2008b) Yield gaps, nutrient use efficiencies and response to fertilisers by maize across heterogeneous smallholder farms of western Kenya. Plant and Soil 313: 19-37.

Tittonell P, Vanlauwe B, Leffelaar PA, Shepherd KD, Giller KE. (2005) Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya - II. Within-farm variability in resource allocation, nutrient flows and soil fertility status. Agric Ecosyst Environ 110: 166-184.

Tre JP, Lowenberg-Deboer J. (2005) Ex-ante economic analysis of alternative mulch-based management systems for sustainable plantain production in Southeastern Nigeria. Agricultural Systems 86: 52-75.

Uri ND. (2000) An evaluation of the economic benefits and costs of conservation tillage. Environmental Geology 39 (3–4) January 2000.

Valbuena D, Erenstein O, Homann-Kee Tui S, Abdoulaye T, Claessens L, Duncan AJ, Gérard B, Rufino MC, Teufel N, van Rooyen A, van Wijk MT. (2012) Conservation Agriculture in mixed crop–livestock systems: Scoping crop residue trade-offs in Sub-Saharan Africa and South Asia. Field Crops Research 132: 175-184.

Valbuena D, Verburg PH, Bregt AK. (2008) A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. Agriculture, Ecosystems & Environment 128: 27-36.

Valentin C, Agus F, Alamban R, Boosaner A, Bricquet JP, Chaplot V, de Guzman T, de Rouw A, Janeau JL, Orange D, Phachomphonh K, Do Duy P, Podwojewski P, Ribolzi O, Silvera N, Subagyono K, Thiébaux JP, Tran Duc T, Vadari T. (2008) Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices. Agriculture, Ecosystems & Environment 128: 225-238.

van der Werf HMG, Petit J. (2002) Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. Agriculture, Ecosystems & Environment 93: 131-145.

van Ittersum MK, Ewert F, Heckelei T, Wery J, Olsson JA, Andersen E, Bezlepkina I, Brouwer F, Donatelli M, Flichman G, Olsson L, Rizzoli AE, van der Wal T, Wien JE, Wolf J. (2008) Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). Agricultural Systems 96: 150-165.

Vazquez-Amabile, #160, G., ENGEL, #160, A. B, FLANAGAN, #160, C. D. (2006) Modeling and risk analysis of nonpoint-source pollution caused by atrazine using SWAT. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, ETATS-UNIS, 12 pp.

Vereijken P. (1997) A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. European Journal of Agronomy 7: 235-250.

Vezina K, Bonn F, Van C. (2006) Agricultural land-use patterns and soil erosion vulnerability of watershed units in Vietnam's northern highlands. Landscape Ecol 21: 1311-1325.

Vu Dinh T, Shiraishi E, Hilger T, Vien TD, Cadisch G. (2012) Maize cropping on steep slopes - the potential of soil cover in mitigating erosion: Experiences from NW Vietnam. In Sustainable Land Use and Rural Devlopment in Mountains Areas. International Scientific Conference, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany, 16-18 April 2012

Wall PC. (2007) Tailoring Conservation Agriculture to the Needs of Small Farmers in Developing Countries. Journal of Crop Improvement 19: 137-155.

Wezel A, Steinmüller N, Friederichsen JR. (2002) Slope position effects on soil fertility and crop productivity and implications for soil conservation in upland northwest Vietnam. Agriculture, Ecosystems & Environment 91: 113-126.

Wilson GV, McGregor KC, Boykin D. (2008) Residue impacts on runoff and soil erosion for different corn plant populations. Soil and Tillage Research 99: 300-307.

Wolz A. (1999) The Transformation of Rural Finance Systems in Vietnam. Discussion Paper 60: Diskussionsschriften der Forschungsstelle für Internationale Wirtschafts- und Agrarentwicklung eV (FIA), Nr 60, Heidelberg 1997.

Annexe 1. Impact of farm income maximization timeline on CA economic attractiveness: preliminary results of a bio-economic farm modeling approach in Northern Vietnam:

Introduction

In densely populated highlands of Asia, land degradation associated with unsustainable land uses particularly affects smallholder farmers. At the same time, the rising demand from agricultural markets for food products calls for further intensification of crop-livestock systems. In such context, conservation agriculture (CA) is often viewed as a promising option for developing sustainable land uses (Kassam et al., 2009). However, its adoption under smallholder farming remains limited (Giller et al., 2009; Kienzler et al., 2012). There is therefore a need to identify contexts, options and conditions making its adoption worth for farmers.

Few authors have investigated economic attractiveness of CA systems under contexts of smallholder farming. Affholder et al. (2010) did so in Vietnam and concluded that the increase in labor and production costs associated with conversion to CA penalized its short-term (e.g. one year) economic attractiveness. In a recent study conducted in Laos, Lienhard et al. (2013) concluded that CA was more productive and profitable than conventional agriculture over four cropping seasons. CA performances indeed account for differentiated agronomic and economic time-effects, formerly emphasized by Erenstein (2003): “CA typically implies a transition stage to become fully technically and socio-economically viable —in terms of yield performances, farmer and researcher learning, investments, local adaptation, fine-tuning of prototypes and institutional change”

Farmer decision-making can be classified as operational, tactic and strategic (Janssen and van Ittersum, 2007). Strategic decisions correspond to those decisions that impact the long-term farm management at a whole. CA is a rupture innovation at farm level (Erenstein, 2003), and thus, decision to adopt CA falls into strategic decision making process which impact in its turns both sequential and operational decisions. The extent to which farmer strategic decisions can be taken in consideration to better profitability on a long-term primarily depend on constraints to resource endowment on a shorter term. It implies that investigating CA economic attractiveness for smallholder farmers requires considering differentiated decision horizons associated with the diversity of short-term constraints on farm resource endowments and expected time of returns on investment.

Bio-economic farm models are suitable tools to *ex-ante* assess the impact of policy and technology change on agriculture, economics and environment (Janssen et al., 2010). In a few recent studies, a dynamic farm model was used to *ex-ante* assess mulch based plantain cropping systems over a three year period in Nigeria (Tre and Lowenberg-Deboer, 2005). CA based maize options with *ex-situ* produced mulch were assessed over one year decision period in Northern Vietnam (Affholder et al., 2010). Comparable resource conservation technologies were also assessed by the mean of bio-economic farm model, including hedgerow and minimum tillage in mid-Hill of Nepal (Das and Bauer, 2012) and intercropping management with cover plants for banana systems in Guadeloupe (Blazy et al., 2010). However, none of these studies specifically explored for a given optimization criteria how changes in performances over time may impact technology adoption.

Within this context, our study aimed at assessing across contrasted farms for resource endowments and across diverse timelines for strategic decision the conditions for CA systems to become economically attractive for farmers.

We specifically focused on the two following questions:
(a) By comparison with the results formerly obtained by Affholder et al. (2010), does the recent context changes (e.g. extension of herbicide use on slopes) and the kind of CA technologies (*in-situ* produced mulch) modify short-term (e.g. one year) CA economic attractiveness in Northern Vietnam?
(b) To which extent the potential attractiveness of CA for farmers is driven by the term considered for profit maximization?
To answer those questions, we investigated by using a bio-economic farm model different *scenarii* accounting for contrasted performance dynamics over time between CA and conventional systems.

Material and methods

1. Site and farm selection

1.1. Site characteristics

We selected 3 villages at walking distance from demonstration sites (Table 1), differing by diversification level and farmer strategies to overcome labor constraints.

Table 1. Main characteristics of the selected sites

Commune	Village	Elevation (m. a.s.l)	Accessibility	Irrigated rice	Tea	Rainfed annual crops	Labor
Chieng Hac	Pieng Lan	500-700	Fair	Yes (2 crops)	No	Maize (1 & 2 crops), canna	Permanent workers in farm system hired for the duration of cropping season
	Ta So	800-1000	Poor	No	No	Maize (1 crop)	Exchange labor
Phieng Luong	Tin Toc	400-700	Good	Yes (1 crop)	Yes	Maize (1 crop), rainfed rice	Exchange labor

1.2. Farm characteristics

Out of those villages we selected 12 farms differing by resource endowment and strategic positioning (Table 2). Selection was made upon local derivation of a typology of farming system formerly developed at regional level (Hauswirth et al., 201X). Farms incorporated lands of diverse agronomic potential alongside topographic sequences. They included irrigated lowland with rice production, dry lowland with perennial crops (tea and orchards) and livestock systems, foot slopes mainly devoted to mechanized cultivation of annual crops (maize, canna, cassava, rainfed rice) and steep slopes where a narrow range of annual crops (mainly maize, secondary rainfed rice and cassava) is cultivated.

1.3. Cropping system characteristics

We compared the range of possible existing systems at a given type of sloping land (e.g. foot slope or mountainous slopes) to a set of alternative cropping system following principles of conservation agriculture (Figure 1). Alternative cropping systems were prototyped under expert knowledge and demonstrated at neighbouring demonstration sites for over 2 years.

Table 2. Main characteristics of the farms selected for modeling

Farm (Village / commune)	Farm type	Farmed land (ha)	Of which (ha)							Labor			Livestock	
			Irrigated land		Dry lowland		Foot slope (Mechanized agriculture)	Mountainous slope (manual agriculture)		Equivalent full time familial worker	Non-farm work	Mouths to feed	Animal for traction	Pigs
			Rice 1 crop	Rice 2 crops	Tea	Fruit		Maize 1 crop	Maize 2 crops					
Chieng Hac														
Pieng Lan B	B	1.4		0.1		-	-	1.3	-	2.0	-	4	1	-
Pieng Lan C	C	5.2	-	0.2	-	1.42	-	2.8	0.8	3.5	-	6	2	14
Pieng Lan D	D	2.4		0.4		-	-	2.0	-	2.0	-	4	1	7
Ta So A	A	1.65	-	-	-	-	0.05	1.6	-	2.0	1	4	-	2
Ta So B	B	1.6	-	-	-	-	-	1.6	-	3.5	0	7	-	8
Ta So C	C	3.0	-	-	-	1.0	-	2.0	-	2.5	1	6	2	20
Ta So D	D	3.1	-	-	-	0.3	-	2.8	-	4.5	1	8	1	15
Ta So E	E	2.9	0.1	-	-	-	-	2.8	-	5.5	1	8	2	5
Phieng Luong														
Tin Toc A	A	1.16	0.06	-	0.2	-	-	0.9	-	2.5	1	6	1	1
Tin Toc B	B	1.55	-	-	0.7	-	0.25	0.6	-	2.5	0	3	-	-
Tin Toc C	C	1.38	0.05	-	0.5	-	0.1	0.7	-	2.5	1	6	-	5
Tin Toc D	D	3.9	-	-	0.1	-	1.5	2.3	-	3.5	1	4	1	2

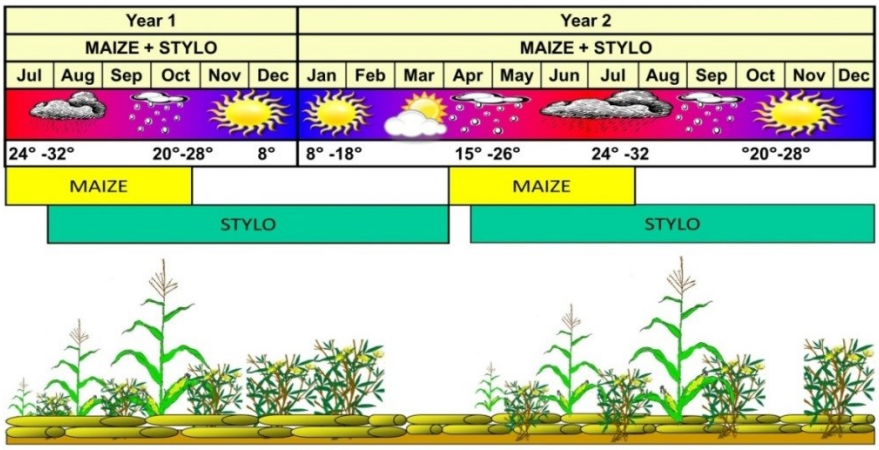
Table 3. Technical coefficients for several modalities of a CA cropping system prototype including maize cultivation on a cover of Stylosanthes guianensis (weedkilled and resown every year). Level of fertilisation (N-P-K, per maize crop): F1: 23-0-0, F2: 69-15-25; F3: 115-37-50. Periods within year: T1: 01/03→15/04; T2: 16/04→15-/05; T3: 15/05→31/08; T4: 01/09→15/10; T5:16/10→28/02

Prototyped cropping system	Maize yields (t.ha-1)		Input cost (USD.ha-1)	Labor intensity (days)	Of w:				
	Crop 1	Crop 2		Total 'year)	T1	T2	T3	T4	T5
Animal traction, F2, 1 crop per year	7.1	-	444	188	12	54	99	23	-
Animal traction, F3, 1 crop per year	8.7	-	767	195	12	54	106	23	-
Manual, F1, 1 crop per year	3.8	-	289	172	19	51	82	20	-
Manual, F2, 1 crop per year	6.0	-	422	173	19	52	82	20	-
Manual, F3, 1 crop per year	8.1	-	763	175	19	54	82	20	-
Manual, F1, 2 crops per year	3.5	2.0	367	334	10	30	178	51	65
Manual, F2, 2 crops per year	5.0	4.0	637	337	10	30	181	51	65
Manual, F3, 2 crops per year	6.3	5.1	1132	345	10	30	189	51	65

The common characteristics of the prototyped systems included:

- Mulching with crop and cover plant residues and weeds at the beginning of the agricultural season
- Direct seeding of maize into mulch
- Direct sowing of cover plants into mulch, associated with maize at first maize weeding

Fig. 1. Representation of a conservation agriculture based prototype of cropping system (maize monocropping on a cover of stylosanthes weedkilled and resown every year.



2. The farm modeling approach

The model formerly developed by Affholder and al (2010) was modified to specifically investigate the economic attractiveness of conservation agriculture across diverse decision timelines and across differentiated performances of CA and CONV over time.

2.1. Objective function

Model was adjusted to maximize the net present value of farm income discounted to inflation at the end of a period made of N years

$$(1) \quad NPV\ (i,N) = \sum_{y=0}^{N} \frac{Ry}{(1+i)^y}$$

Where

NPV: *net present value*
N: *total number of years*
Ry : *net cash flow on year y*
i: *discount rate*

We used for discount rate the mean annual interest proposed by the Vietnamese agricultural bank for 2 year deposits as per 2011, discounted by the mean annual increase of Consumer Price Index between 2003 and 2013 published by the General Statistic Office of Vietnam.

2.2. Indicator

We used a simulated conversion rate corresponding to the percentage of sloping land converted into CA at the term used for maximizing the net present value of farm income. This indicator represented the extent to which prototyped CA systems were economically attractive for virtual rational farmers basing their farm plan on a full knowledge of dynamics of cropping system performances over time.

2.3. Data used in simulations

Technical coefficients of cropping systems included inputs (such as labor and capital use at a given period of the year) and outputs (such as yields). Technical coefficients associated with existing cropping systems were derived from a farm survey at district level conducted in 2011 and records made at neighboring demonstration sites over two years. Technical coefficients for alternative cropping systems (Table 3) were derived from records made at neighboring demonstration sites. To account for differences between years, yields were averaged over two years for both prototypes and farmer systems. Economic data (such as prices at a given period of the year) were averaged from those recorded during the local farm survey. Prices for non-locally available inputs (such as seeds of cover plants) were derived from purchases made to implement demonstration sites. In the baseline scenario, we assumed that cover plant had no on-farm or commercial valorization.

2.4. Scenarios

Baseline scenario

In the baseline scenario, we considered that CA would keep yields from the second year at a similar level than those taken for reference over the whole period investigated. We also considered that yields under conventional agriculture would not be penalized by continuous tillage.

Alternative scenario: differentiated cropping system performances over years

In this scenario, we assumed that (i) CA would lower reference yields by 10% the first year and that (ii) CA would have a cumulated positive effect on yields over time from the second year after conversion.

We assumed that yields of cropping systems under conventional agriculture would gradually decrease from the second year under continuous tillage. We assumed that a farmer taking decision to convert to CA a given part of his fields would not change his mind over time. To investigate this scenario, we introduced two coefficients accounting for differentiated performances of cropping systems on sloping lands over time according to the respective durations under CA and conventional agriculture

$$(2) \quad PCA = \sum_{i=1}^{N} SCA_{New}\ (i).Yield\ CA_1.(1+k_1)^{N-i}$$

$$(3) \quad PCONV = \sum_{i=1}^{N} SCONV_{New}\ (i).Yield\ CONV_1(1-k_2)^{N-i}$$

So that

$$(4) \quad SCA_{New}(i+1) \geq SCA_{New}(i)$$

Where :

PCA : *Production of CA in year N*

$PCONV$: *Production of CONV in year N*

$SCA_{New}\ (i)$: *Area newly converted into CA in year i*

$SCONV_{New}\ (i)$: *Area newly converted into CONV in year i*

k_1 : *Coefficient representing the cumulated effect of CA on yields over time*

k_2 : *Coefficient representing the cumulated effect of CONV on yields over time*

$Yield\ CA_1$: *Yield of CA in year 1*

$Yield\ CONV_1$: *Yield of CONV in year 1*

Preliminary results

1. **Only farmers having capacity to deal with a two-year economic objective can potentially be interested in converting to CA.**

Simulated conversion rates associated with a one year maximization objective were lower than 25% in all farm types and null in most of the cases (Fig 2a, 2b and 2c). This result is consistent with what was formerly reported by Affholder and al., 2010.
The extent to which CA was virtually adopted considering a two-year maximization objective greatly varied across farm types (Fig 2a, 2b and 2c).
In 5 farms over 12, the simulated conversion rate associated with a 10 years maximization objective did not exceed a threshold comprised between 0.2 and 0.8. In four cases (Ta So A, Tin Toc B, C and D, this result was associated to contrasted conversion rates between mountainous sloping land, where CA was virtually adopted, and footslopes, where the conventional two-year rotations between maize and canna (*Canna edulis L.*) performed better than the CA prototypes. In one case (Pieng Lan C), this threshold was associated with bottlenecks in labour and cash constraints at farm level.

2. **Economic opportunity to convert to CA is subjected to threshold effects whose amplitude depends on farm type.**

Sensitivity of simulated conversion rates to maize prices under a two year objective of farm income maximization greatly varied across farm types (Figures 3a, 3b, 3c). Amplitude of threshold effects in economic opportunity to convert to CA therefore differed between farm types. These contrasted results can be explained by two factors: The first factor is the capacity of increased maize production under CA to compensate the increase in production costs, which depended on the one hand on economic context and on the other hand of the relative cost increase under CA for a given intensification level. The second factor is the suitability of CA systems to farm constraints (mainly changes in labor allocation), which depended on simulated farms.

3. **The sensitivity of CA economic opportunity to gradual negative impact of continuous tillage on crop productivity varies across farm types.**

We investigated for two contrasted farm systems (Tin Toc B and Ta So C) the sensitivity of simulated conversion rates to, on the one hand, timeline considered for farm income maximization and, on the other hand, the coefficient k2 representing gradual negative impact of continuous tillage over time (Figures 4a and 4b).
For Tin Toc B, simulated conversion rates appeared more dependent on timeline considered for farm income maximization than on cumulated negative impact of continuous tillage on yields over time. For Ta So C, opportunity of conservation agriculture sensibly increased with a gradual negative impact of continuous tillage on crop yields as low as 5% per year.

These results suggest that the sensitivity of CA economic opportunity to gradual negative impact of tillage on crop yields is strongly dependent on farm characteristics.

Fig. 2a. Simulated CA conversion rate for diverse timelines of farm income maximisation (Ta So village of Chieng Hac commune)

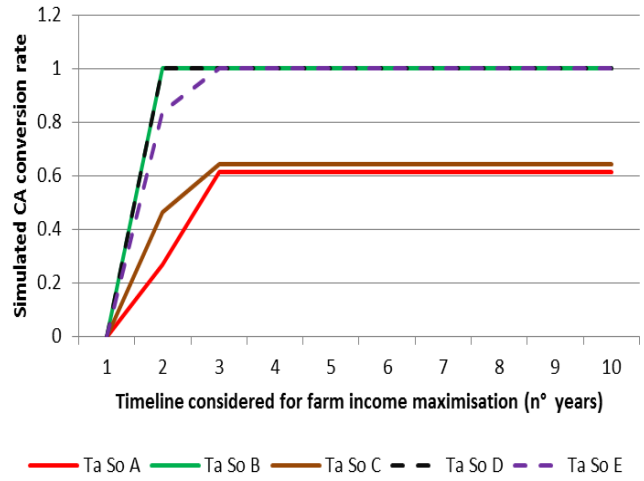


Fig. 3a. Sensitivity analysis to maize price of simulated CA conversion rate under maximisation of farm income over 2 years (Ta So village)

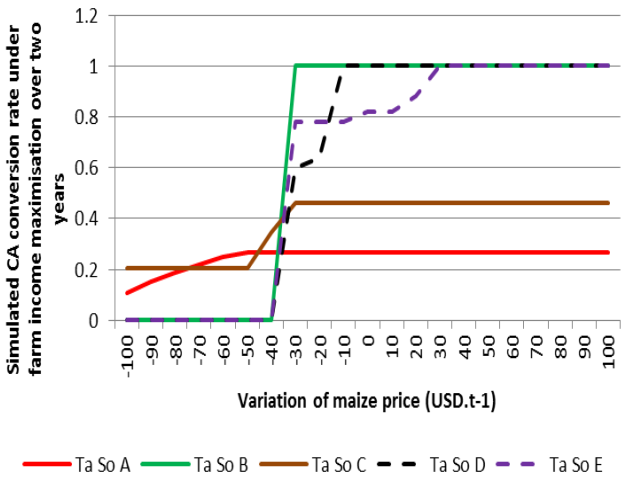


Fig. 2b Simulated CA conversion rate for diverse timelines of farm income maximisation (Tin Toc village of Phieng Luong commune)

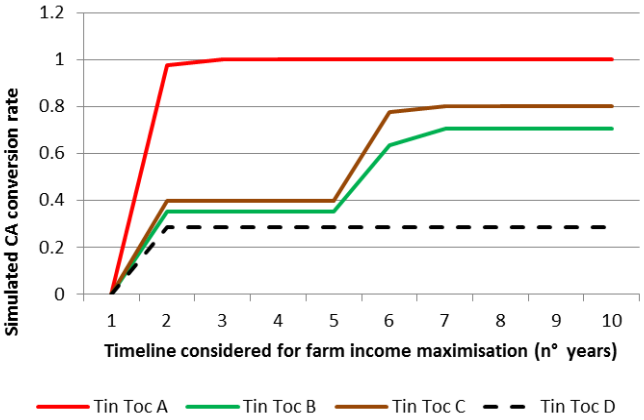


Fig. 3b. Sensitivity analysis to maize price of simulated CA conversion rate under maximisation of farm income over 2 years (Tin Toc village)

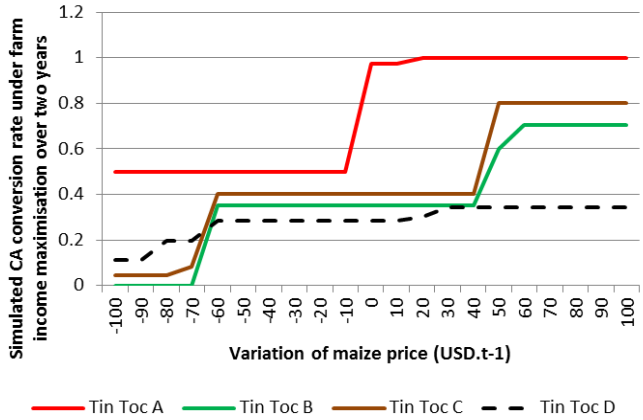


Fig. 2c. Simulated CA conversion rate for diverse timelines of farm income maximisation (Pieng Lan village of Chieng Hac commune)

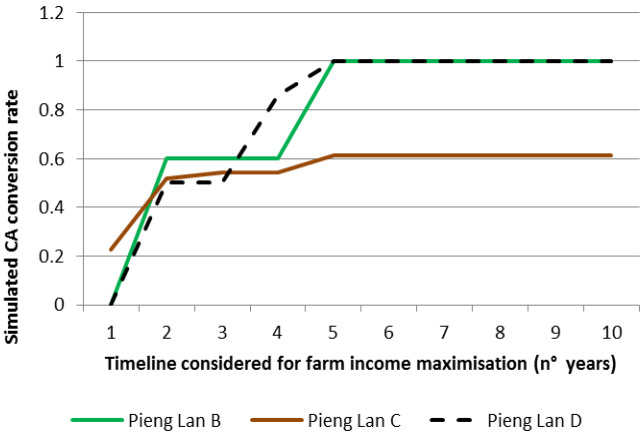
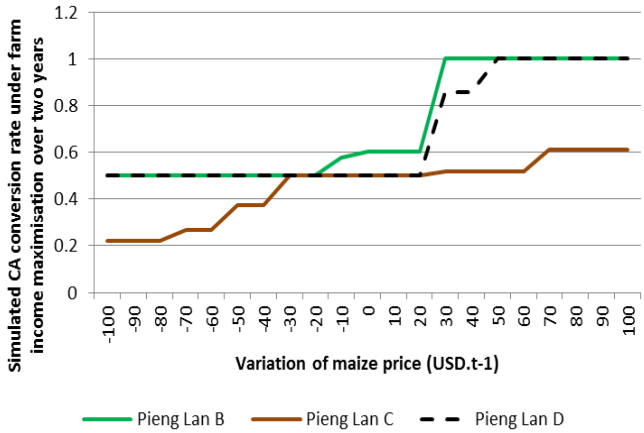
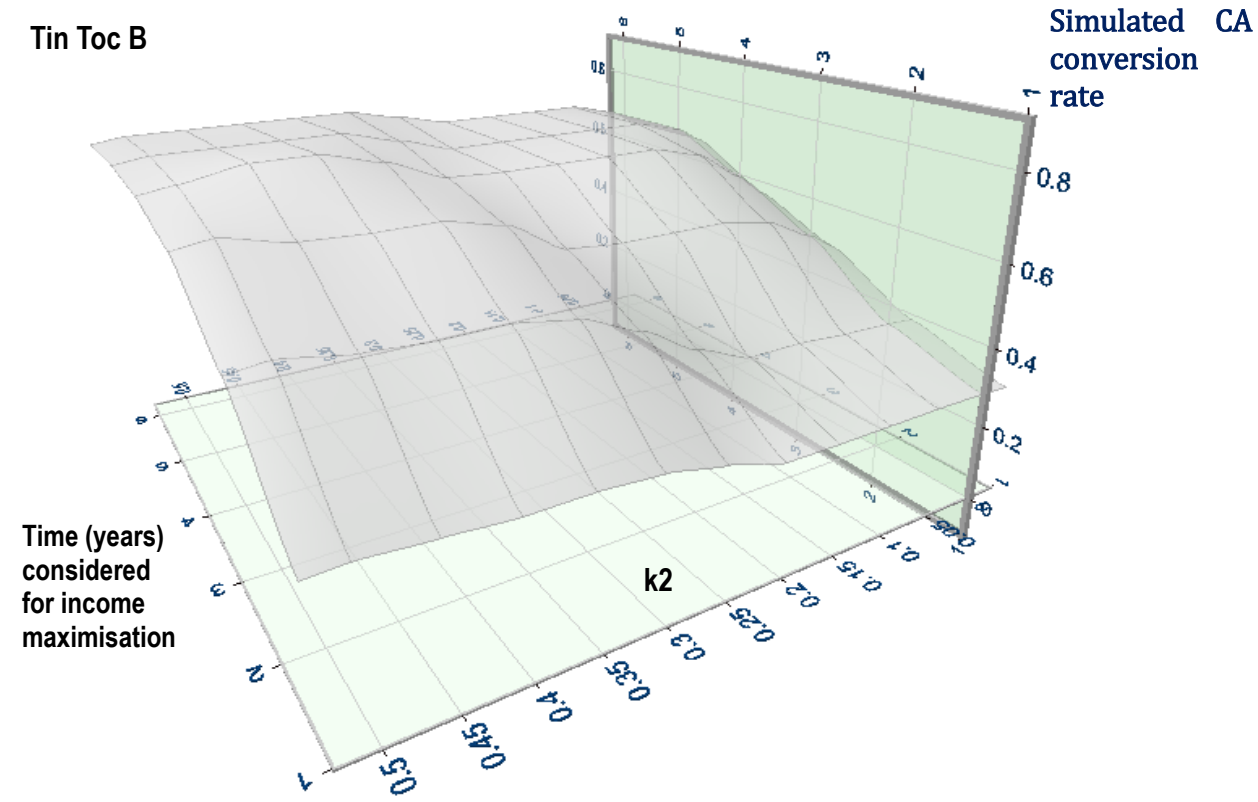
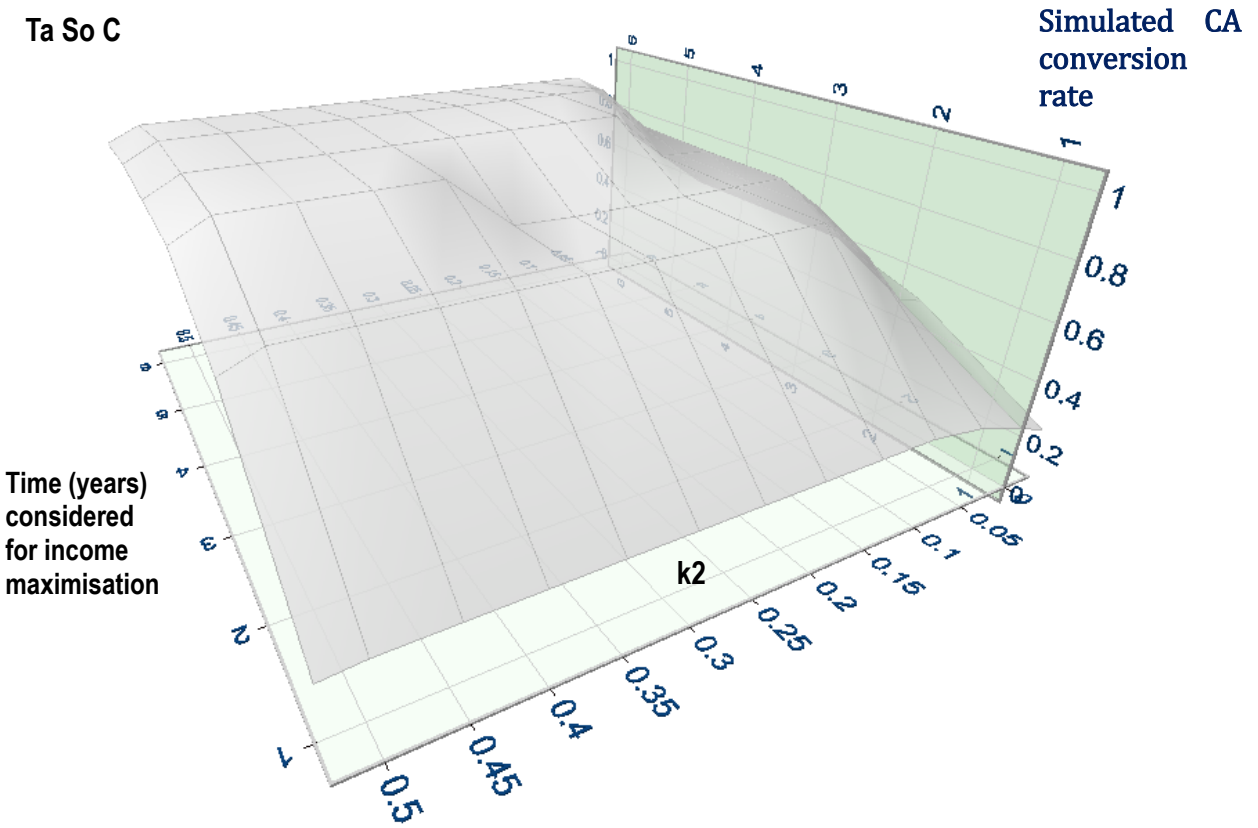


Fig. 3c. Sensitivity analysis to maize price of simulated CA conversion rate under maximisation of farm income over 2 years (Pieng Lan village)



Figures 4a (top) and 4b (bottom). Simulated CA conversion rates for farms Tin Toc B (top) and Ta So C (bottom) according to the timeline considered for farm income maximisation and the coefficient k2 representing the amplitude of cumulated negative impact of continuous tillage on crop yields





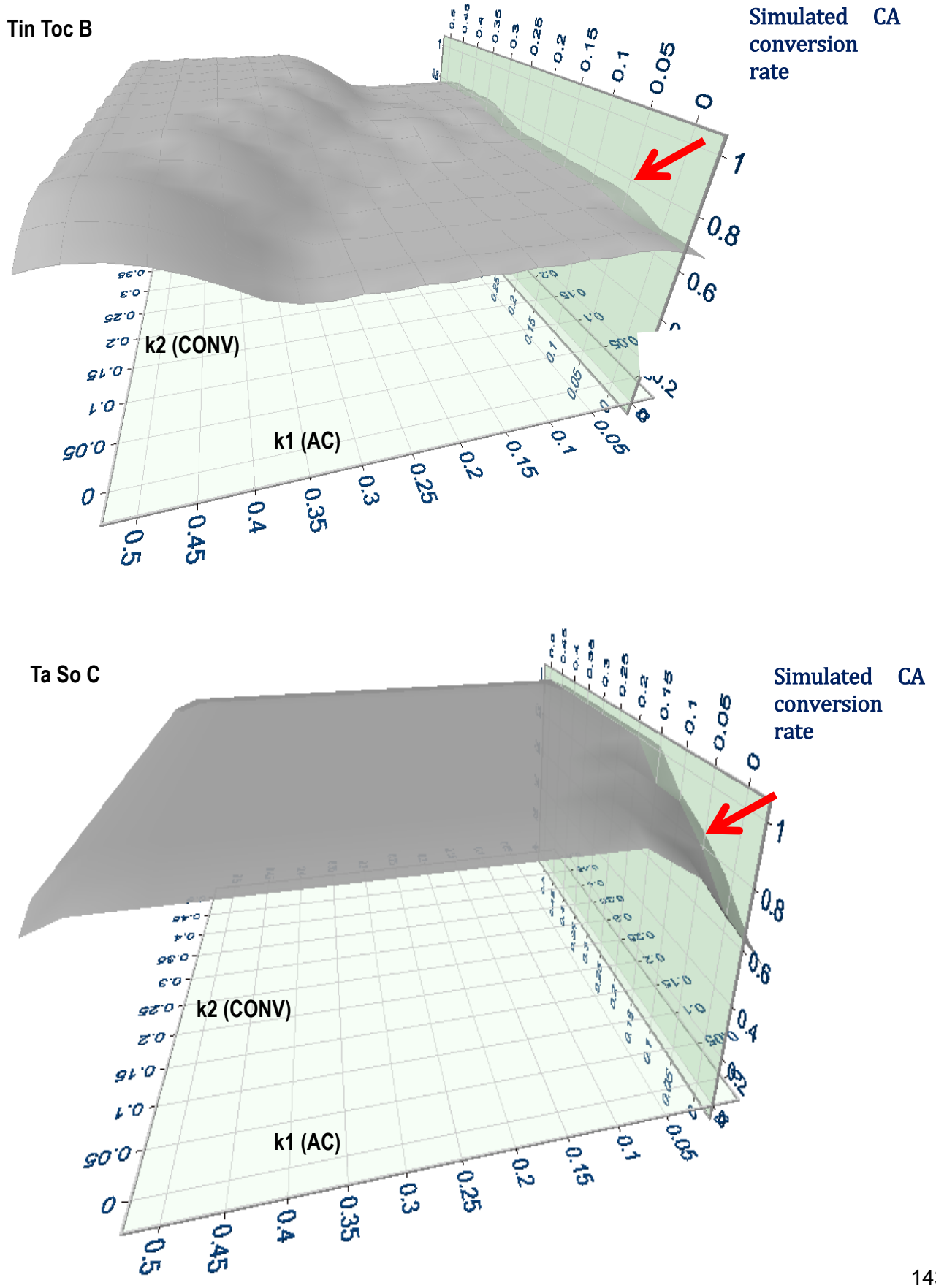
4. Simulated economic opportunity to convert to CA for a given decision timeline can be quite stable with regards to slight differentiated performances of cropping systems over time

We investigated for a diversified and a specialized farm system (respectively Tin Toc B and Ta So C) the sensitivity of simulated conversion rates under a 5-year objective of farm income maximization to the coefficients k1 and k2. Those coefficients represented respectively the gradual positive impact of conservation agriculture on crop yields over time and the gradual negative impact of continuous tillage on crop yields over time (Figure 5).

This figure shows that the simulated economic opportunity to convert to CA for a given time horizon strongly differs among farms: In the case of Tin Toc B, the economic opportunity to convert to CA remains rather stable with regards to slight differentiated impact of agriculture type on crop yields over time. In the case of Ta So C, economic opportunity to convert to CA rapidly increase with slight differentiated impact of agriculture type on crop yields over time.

Further research remains needed to determine which key farm aspects make CA economic attractiveness more sensitive to cumulated impact of agriculture type on crop performances over time.

Figure 5a (top) and 5b (bottom). Simulated CA conversion rate upon a 5 year profit maximisation for farms Tin Toc B (top) and Ta So C (bottom) considering different values of k1 and k2, respectively representing the amplitude of cumulated impact over time of CA and conventional agriculture on crop yields (Alternative scenario).



Annexe 2. Diaporama présenté lors de la soutenance de thèse du 18/12/2013

Unités de recherche

SYSTÈMES DE CULTURES ANNUELLES

UR System Systèmes et Ingénierie Agronomique

Au sein de

Montpellier SupAgro

Financement

afd

RIME-PAMPA 3

cirad

Evaluation agro-économique *ex-ante* de systèmes de culture en agriculture familiale : Le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (Nord Vietnam)

Direction:
Jacques Wery (UMR-system / Supagro)
Pablo Tittonell (UR SCA – Univ. Wageningen)
Co-encadrement:
Damien Jourdain (CIRAD / AIT - UMR G-Eau)
François Affholder (CIRAD - UR SCA)

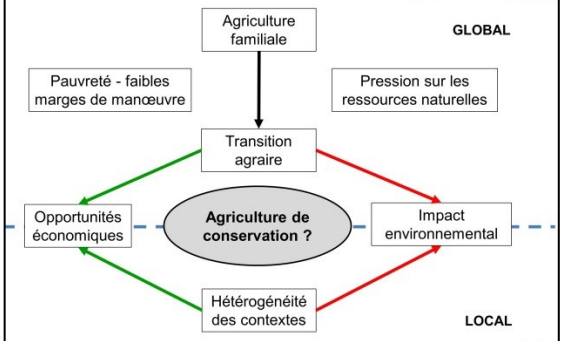
Damien Hauswirth,
Montpellier, 18 décembre 2013

Plan

1. Problématique, objectif et démarche
2. Eléments de contexte agraire sur l'agriculture familiale en ZTH de montagne du Nord Vietnam
3. Diversité, déterminants et durabilité des systèmes de culture conventionnels
4. Performances à court terme de prototypes de SC en agriculture de conservation
5. Attractivité économique de l'AC selon l'horizon de revenu considéré – scénarii d'impact cumulatif du type d'agriculture sur les performances des systèmes (modélisation)
6. Perspectives

1. Problématique - 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

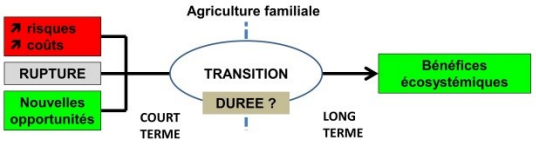
1) Problématique



1. Problématique - 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

Problématique et objectif

- AC = 3 principes : perturbation minimale du sol + couvert végétal permanent + diversification (successions ou associations) – FAO, 2008
- 120 millions d'ha surtout en agriculture mécanisée → contraintes à l'adoption en agriculture familiale



- Effets sur performances agronomiques à CT et LT bien documentés
- Attractivité économique en agriculture familiale faiblement explorée

→ Identifier les contextes et options favorables au développement de l'agriculture de conservation en petite agriculture familiale au sud

1. Problématique - 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

Démarche générale

Diagnostic régional (1)
Systèmes existants
Opportunités & contraintes
- Déterminants de la diversité des SC ?
- Durabilité des SC conventionnels ?

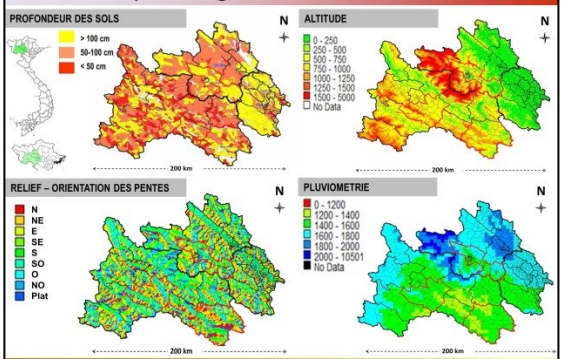
Evaluation prototypes SC (2)
Matrices de création-diffusion
Impact à court terme
- Durée d'amélioration des performances agronomiques & économiques en AC ?
- Utiliser des données de démonstration pour renseigner un modèle bioéconomique?

Modèle de ferme (3)
Jeu d'exploitations
Prototypes - scénarios
- Attractivité économique de l'AC à ≠ horizons de revenu ?
- Scénarios d'impact cumulatif du type d'agriculture sur la productivité ?

Résultats préliminaires

1. Problématique - 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

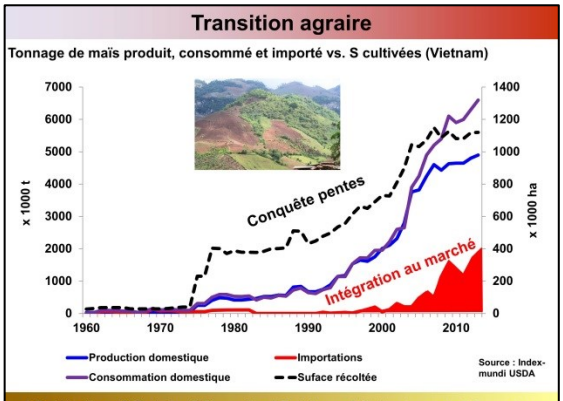
2) Hétérogénéité des contextes



1. Problématique – 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

Transition agraire

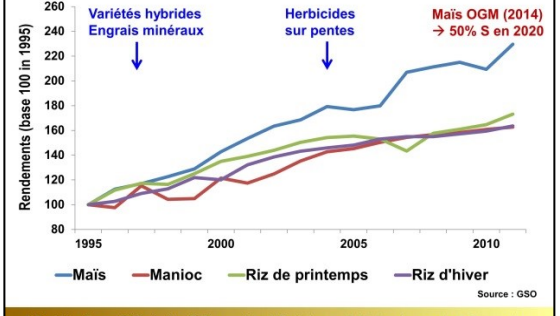
Tonnage de maïs produit, consommé et importé vs. S cultivées (Vietnam)



1. Problématique – 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

Progrès techniques

Evolution relative du rendement des principales cultures annuelles (1995-2011) dans la région de moyenne altitude et de montagnes du Vietnam

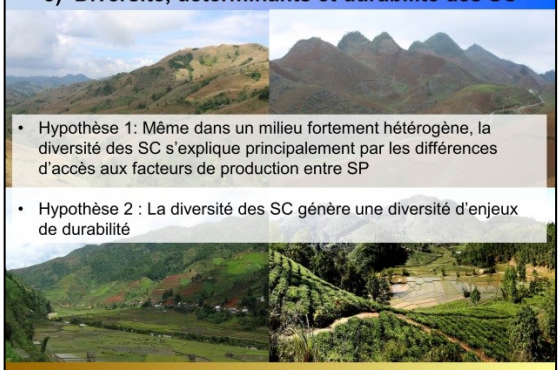


1. Problématique – 2. Contexte – 3. Diagnostic – 4. Prototypes – 5. Horizon temporel – 6. Perspectives

Durabilité des pratiques ?

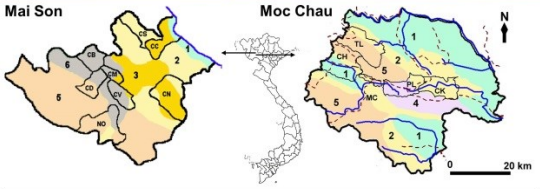
Impact environnemental élevé

3) Diversité, déterminants et durabilité des SC



- Hypothèse 1: Même dans un milieu fortement hétérogène, la diversité des SC s'explique principalement par les différences d'accès aux facteurs de production entre SP
- Hypothèse 2 : La diversité des SC génère une diversité d'enjeux de durabilité

6 écorégions maïsicoles



Zone	Altitude	Relief	Densité pop.	Type d'agriculture
Z1	<600	Pentes	-	Diversifiée 2 maïs par an, forêt
Z2	600-1000	Pentes	++	Diversifiée (maïs / canna)
Z3	500-700	Plaine d'altitude	+++	Spécialisée (canne, maïs)
Z4	1000	Plateau collinaire	+++	Spécialisée (thé, lait, maïs)
Z5	>1000	Pentes	+	Monoculture de maïs
Z6	800-1200	Pentes collinaires	+	Maïs – café - forêt

Démarche d'identification et caractérisation des SC

411 EA
670 parcelles de maïs

23 variables

13 indicateurs

Types SC (Y)
AFC, AHC

Types SP (x_1)
ACP, AHC

Ecorégions (x_2)
Zonage

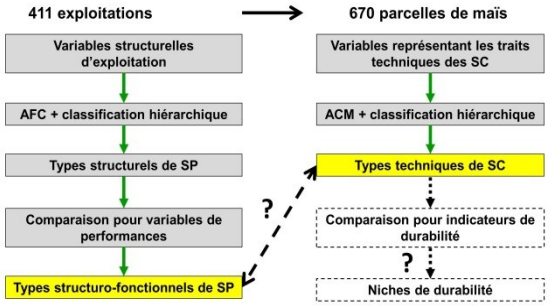
Autres facteurs (x_n)
Hypothèses

Y=f(x) ?
CART - 4 modèles
SC = f (parcelles)
SC = f (EA)
SC = f (territoires)
SC = f (var. combinées)

Durabilité = f(Y) ?
Comparaison types SC
→ Indicateurs
Identification
→ Ecarts de durabilité
→ Marges d'amélioration

IDENTIFICATION	CARACTERISATION	PERFORMANCES
Analyse multivariée	Arbres de classification	Comparaison non paramétrique

Identification des systèmes agricoles



5 types de systèmes de production

TYPE SP	MOYENS DE PRODUCTION	PRIORITE CT	STRATEGIE / CONTRAINTE	ORIENTATION LT *SOURCE DE REVENUS*
A	Terre Capital (Travail)	Subsistance	Migration Vente MO	Spécialisation agri. forcée *SC / SE de petite taille* Diversification économique *Emploi temporaire, solidarité*
B (Seuil pauvreté)	(Terre) Capital Travail	Atténuation risques	Emprunt Agriculture sous contrat	Diversification agricole *SC à intensification intermédiaire, SE extensifs*
C	Terre Capital Travail	Intégration au marché	Achat ou location foncière	Diversification économique *Emploi ext., service agricole,*
D				Intensification agricole *SC intensifs, SE moyens*
E	Terre Capital Travail	Accroître revenu	Motorisation Emploi MO Mise location	Diversification économique *Fourniture crédit, intrants…..* Spéc. agricole tirée / marché *SC intensifs, grands SE*

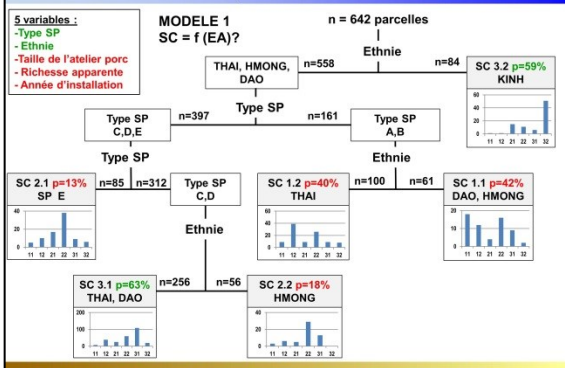
7 types de systèmes de culture

Les SC « fertilisation N faible ou moyenne & vente en épis »
- Défriche parfois motorisée, brûlis occasionnel, houage, usage d'herbicides (Type 1.1)
- Défriche manuelle, brûlis, labour mixte et N faible (Type 1.2)

Les SC « défriche manuelle, brûlis et labour mécanisé »
- N élevé, désherbage manuel (Type 2.1)
- N faible ou moyen (Type 2.2) et :
  - Désherbage manuel (Type 2.2.1)
  - Herbicides (Type 2.2.2.)

Les SC « sans brûlis avec herbicides »
- Défriche & labour motorisé ou en TA, N moyen (Type 3.1)
- N élevé et vente en grains (Type 3.2)

Déterminants SC par arbres de classification



Déterminants de la diversité des SC

Type	Territoires	Acteurs	Parcelles
1.1	Zones de pentes peuplées MC: Villages sans riz irrigué	Pauvres	TA non réalisable Inclut collines fertiles
1.2	Collines et pentes abruptes	ns	TA non réalisable Sols jaunes à MC
2.1	MC : peu peuplé MS: faible altitude	ns	- loin & sol rouge / noir - proches & peu fertiles
2.2.1	Altitude > 700 m	ns	Fertilité < moyenne
2.2.2	ns	ns	Fertilité élevée dont sols jaune (700 à 1000 m)
3.1	MC: villages avec riz irrigué hors du plateau	Ethnie SP C ou D	- proches & fertiles - loin & sol jaune-rouge
3.2	Plateau de Moc Chau	Kinh, capacité investissement	Terres rouges

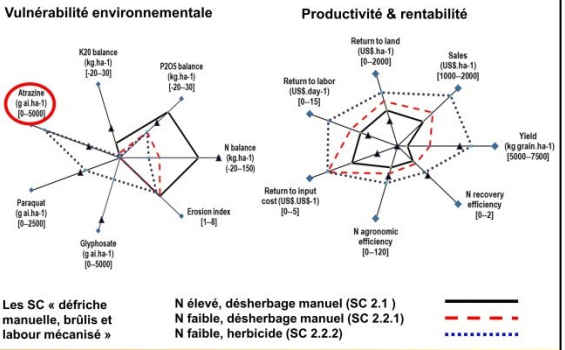
- **Pas de lien direct entre type de SC et type de SP**
- **Hiérarchie des déterminants de la diversité des SC**
  Territoires > Parcelles > EA

Evaluation multicritère de la durabilité des SC

Hypothèses sur facteurs critiques de durabilité	Productivité, efficience agro., rentabilité, vulnérabilité environnementale…
Dérivation indicateurs représentativité - *parcimonie - opérationnalité*	Rendements, balance NPK, productivité de la terre, du travail, dose herbicide,…
Mesure des indicateurs pour chaque parcelle	Mesures à dire d'acteurs (enquêtes)
Comparaison SC pour valeur indicateurs *Test de Kruskal Wallis*	
Comparaison à des seuils de signification	1750 g a.i. atrazine ha-1.an-1 (max USA) 150 kg N.ha-1 (directive nitrate UE) 5 USD / jour (salaire journalier)….

Lopez-Ridaura S. et al., Ecological Indicators 2 (2002) 135–148

Exemple de profils de durabilité contrastés



Les SC « défriche manuelle, brûlis et labour mécanisé »

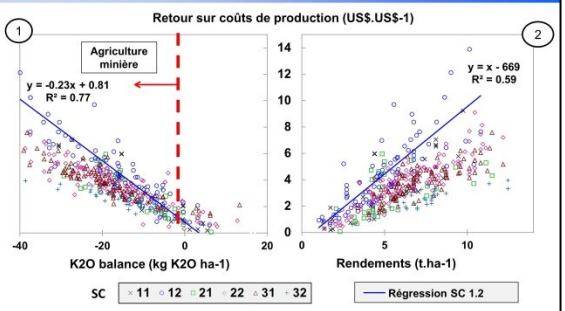
N élevé, désherbage manuel (SC 2.1)
N faible, désherbage manuel (SC 2.2.1)
N faible, herbicide (SC 2.2.2)

Ecarts et atouts de durabilité contrastés

Critère	Indicateur	Type de SC	1.1	1.2	2.1	2.2.1	2.2.2	3.1	3.2
Productivité agri.	Rendements								
Efficience agro.	Efficience azotée								
Vulnérabilité agro-environnementale	Dose a.i. herbicide (atrazine)								
	Index érosion								
	Minage K			+NP					
	Excès N,P								
Diversité agricole	Fréquence maïs / 5 ans								
Dépendance agro-économique	Intensité intrants								
	Coûts de production								
	Travail requis								
Rentabilité économique	Retour sur coûts production								
	Productivité travail								
	Productivité terre								

- Identification facteurs critiques de durabilité communs (K, atrazine) ou spécifiques
- Diversité SC → diversité enjeux / opportunités durabilité

Compatibilité des objectifs de durabilité ?



- Compromis entre objectifs de rentabilité & réduction impact environnemental (1)
- Compatibilité d'objectifs entre rentabilité et productivité (2)

Limites de l'étude

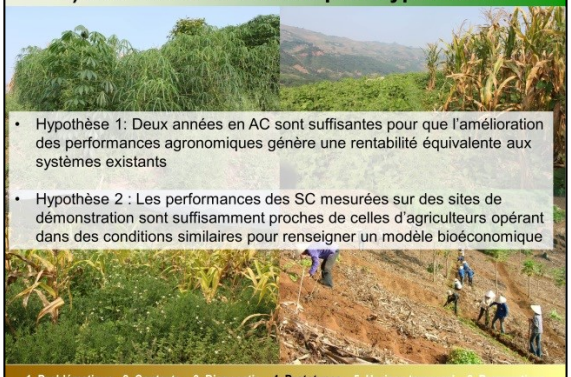
Résultats

- Hypothèse d'un lien direct entre SC et SP réfutée
- Hypothèse d'écarts de durabilité différentiels selon les SC validée
- Méthode reproductible de diagnostic régional exploratoire
- Identification de facteurs critiques de durabilité

Limites

- Affiner localement les types décrits (approche compréhensive)
- Analyse basée sur 1 année → variabilité temporelle ?
- Indicateurs indirects de pression environnementale basés sur les pratiques → changement d'échelle ?

4) Evaluation *ex-ante* de prototypes de *SC*



- Hypothèse 1: Deux années en AC sont suffisantes pour que l'amélioration des performances agronomiques génère une rentabilité équivalente aux systèmes existants
- Hypothèse 2 : Les performances des SC mesurées sur des sites de démonstration sont suffisamment proches de celles d'agriculteurs opérant dans des conditions similaires pour renseigner un modèle bioéconomique

Evaluation *ex-ante* à partir de démonstrations

- Attractivité économique AC pénalisée dans un horizon d'1 an du fait de l'augmentation des coûts de production (Affholder et al. 2009)
- Faible probabilité d'adoption en AF de technologies pénalisant les performances à CT dans l'espoir de performances améliorées à LT

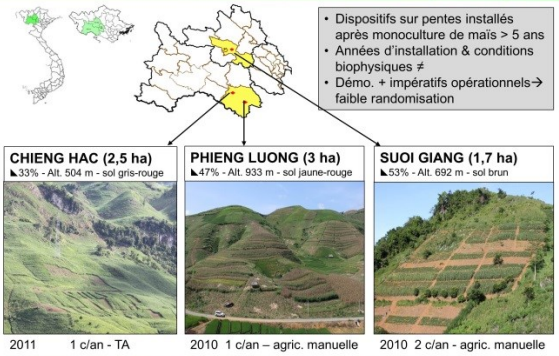
→ Durée minimum pour bénéficier de performances agronomiques et économiques améliorées ?

- Projets basés sur matrices de création-diffusion (Séguy, 1976) répliquées dans ≠ contextes + gamme large de SC à ≠ niveaux d'intensification
- Potentiel / diversité mais coût important et sous-valorisation scientifique

→ Perspectives de renseignement d'un modèle bioéconomique à partir des données issues de démonstration ?

- Etude de cas à partir projet typique de RD : ADAM Vietnam
- ↗ performances attendue en lien à offre minérale plutôt que bilan hydrique

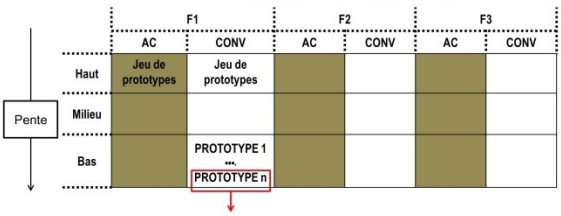
Sites de démonstration contrastés (ADAM)



Jeu de prototypes adaptés aux conditions locales

- Prototypes = succession de culture sur 2 ans + techniques spécifiques
- Conception à dire d'expert combinant démarche de novo (prospective) et pas à pas (adaptative)
- Prototypes : « concept cars » ≠ processus d'innovation
- Prototypes ajustés localement → différences selon le site (dates de semis, double culture, TA…)

Principes des dispositifs de démonstration



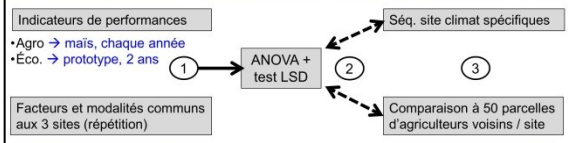
2 séq. culturales / prototype cultivées simultanément sur parcelles jumelles

Ex: rotation biannuelle maïs / manioc

Année 1 : Maïs / Manioc → Année 2 : Manioc / Maïs

→ Les 2 séquences culturales annuelles d'un prototype sont présents chaque année

Analyse en regroupement



2 types de fertilisation

F2 (intermédiaire) F3 (élevée + micronutriments)

4 options de rotation culturale

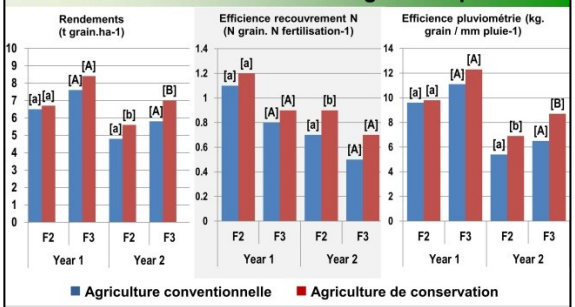
Monoculture de maïs (1) | Rotation maïs-manioc (2) | Rotation maïs-riz pluvial (3) | Rotation maïs-arachide (4)

2 modes de gestion

AC Conventionnel

Temps considéré sous l'angle du nb. d'années de démonstration

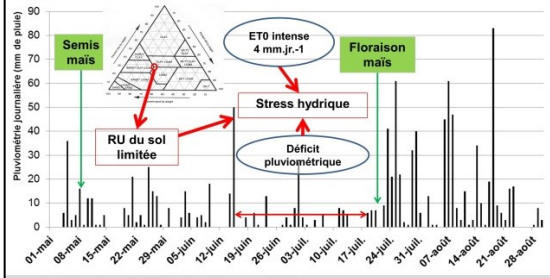
Productivité et efficience agronomique



- Absence d'impact de l'AC en année 1
- AC améliore le rendement et l'efficience agronomique en année 2
- Baisse des indicateurs agronomiques entre années 1 & 2

Performances liée à séquences site-climat spécifiques

Pluviométrie journalière à Chieng Hac (mm) en 2012



- **Amélioration du bilan hydrique en AC ?**
- **Baisse significative de productivité & d'efficience entre 1ère et 2ème année propre aux séquences site-climat observées**

Performances liées à séquences site-climat spécifiques

Paramètres de sol mesurés à Chieng Hac 2 ans après installation de l'essai (n=126)

		pH KCl	OC %	N tot %	NO3 mg.kg-1	P Olsen mg.kg-1	CEC Cmol.kg-1	Cations échangeables mg.kg-1 K	Ca	Mg	Na
F3	CA	4.9 a	3.2 a	0.2 a	45.5 a	149.7 a	16.1 a	95.4 a	2342 a	214 a	7.2 a
	CONV	4.2 b	2.4 b	0.1 b	20.7 a	98.5 a	13.2 b	76.7 a	1625 b	224 a	7.0 a
F2	CA	3.8 A	2.3 B	0.1 A	43.8 A	70.4 A	13.4 A	85.1 A	1626 A	191 A	6.2 A
	CONV	4.0 A	2.3 B	0.1 A	17.0 A	69.0 A	12.4 A	74.2 A	1553 A	177 A	5.9 A

Chieng Hac :
Amélioration taux de MO, pH, N total et CEC après 2 ans en AC à F3

Suoi Giang
Aucune amélioration des paramètres du sol constatée après 3 années en AC

SPECIFICITE DES SEQUENCES SITE-CLIMAT

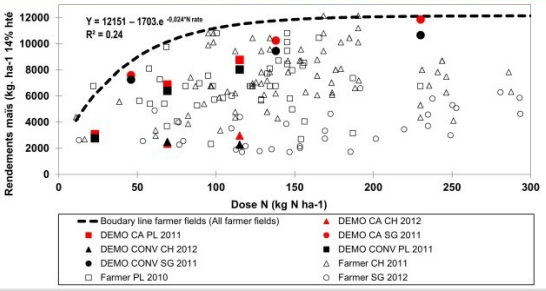
Acceptabilité et rentabilité économique

Valeurs moyennes cumulées sur 2 ans des indicateurs d'acceptabilité et de rentabilité économique comparés à F2 et F3 entre CONV et AC

		Acceptabilité		Rentabilité économique		
Type de fertilisation	Type de gestion	Coûts de production (US$.ha^{-1})	Travail (jr.ha^{-1})	Productivité de la terre (US$.ha^{-1})	Productivité du travail (US$.jr^{-1})	Retour sur coûts de production (US$.US^{-1})
F2	CONV	784 A	439 A	1651 A	4.1 A	2.2 A
	AC	931 B	434 A	1678 A	3.7 A	1.9 A
F3	CONV	1515 α	424 α	1206 α	2.6 α	0.9 α
	AC	1645 β	468 α	1386 α	2.9 α	0.9 α

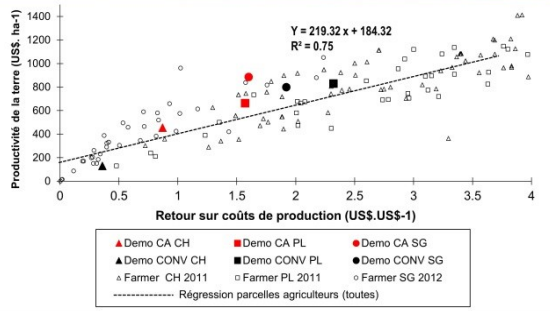
Amélioration des performances agronomiques la 2ème année insuffisante pour offrir une meilleure rentabilité économique sur 2 ans, du fait de l'augmentation des coûts de production

Cohérence des données de rendement



→ Données cohérentes pouvant renseigner un modèle visant à explorer l'attractivité économique de l'AC
→ Fortes variations spatiales et interannuelles à intégrer dans l'exploration

Cohérence des données économiques



Données éco. issues des matrices cohérentes avec parcelles des paysans voisins
→ possibilité de les utiliser pour modélisation de l'attractivité économique de l'AC

Limites de l'étude

Résultats

- Hypothèse sur possibilité de construire des SC présentant une rentabilité similaire aux systèmes conventionnels en 2 ans **validée**
- Hypothèse sur possibilités d'utiliser les données mesurées sur des matrices dans une perspective de modélisation bioéconomique **validée**.

Limites

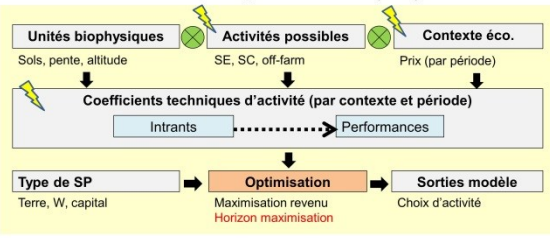
- Conclusions valables pour les conditions spécifiques observées
- Intégrer des prototypes intermédiaires
- Parcelles d'agriculteurs voisins explorées une seule année / site
- Evaluation à l'échelle de la parcelle → Quels liens aux types de SP préalablement identifiés ?

5) Analyse bioéconomique (résultats préliminaires)

Décisions stratégiques d'EA prises à ≠ horizons de retour sur investissement espéré sous contraintes CT d'accès aux facteurs de production

→ Evaluation attractivité à ≠ horizons de revenu

- Modification modèle bioéconomique Affholder et al. (2009)



Adapté de Affholder F., Jourdain D., Scopel E., Alary V. Innovation and Sustainable Development in Agriculture and food – June 28 / July 1, 2010

Eléments d'application du modèle

- 12 EA représentatives des types de SP identifiés (partie 3)
- 3 villages à proximité des matrices représentant un gradient de spécialisation et différentes formes d'organisation pour le travail
- Prototypes AC dont les coefficients techniques sont dérivés des sites de démonstration (partie 4)
- Introduction de coefficients k1 & k2 représentant l'impact cumulatif du type d'agriculture sur le rendement

(1) $R\,AC_{n+1} = R\,AC_n .(1+k1)$

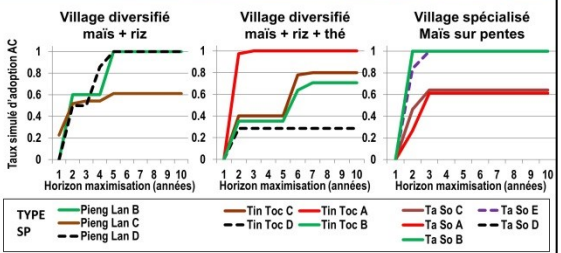
(2) $R\,CONV_{n+1} = R\,CONV_n .(1-k2)$

- 2 scénarios

→ Scénario A : k1 = k2 = 0
→ Scénario B : rendement AC -10% en année 1, k1 & k2 >0 &

- Simulation du taux de conversion à l'AC selon horizon de revenu

Adoption selon l'horizon temporel (scénario A)

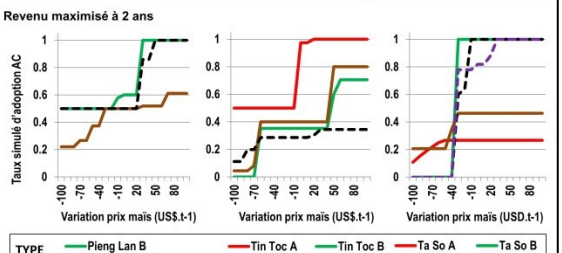


- Attractivité AC augmente avec horizon de revenu considéré
- Adoption AC nulle ou faible sur horizon 1 an et variable sur horizon 2 ans
- Adoption plafonnée dans certaines EA

→ AC adoptée sur pentes non mécanisables mais pas sur bas de pente en TA

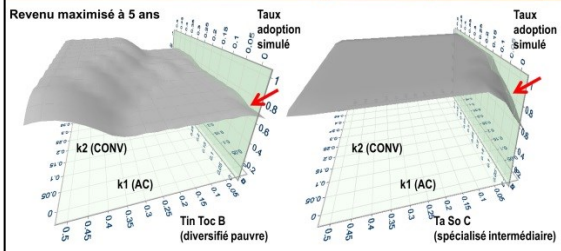
Sensibilité au contexte économique (scénario A)

Revenu maximisé à 2 ans



- La sensibilité du taux d'adoption au prix du maïs varie selon l'EA.
- Pas de régularité pour un village ou un type de SP donné

Sensibilité à effet cumulatif agriculture (scénario B)



- Effet variable sur les taux d'adoption de l'impact cumulatif du type d'agriculture sur les performances
- Tin Toc B: Taux d'adoption stable pour un impact cumulatif élevé du type d'agriculture
- Ta So C: Taux d'adoption ↗ rapidement pour un faible impact cumulatif du type d'agriculture sur les performances

Limites de l'étude

Résultats

- Possibilité de coupler matrices et évaluation d'attractivité économique par modélisation bioéconomique confirmée
- Importance de l'horizon de revenu considéré dans l'évaluation de l'attractivité économique de prototypes de SC confirmée
- Sensibilité variable du taux d'adoption de l'AC au contexte économique & à l'amplitude de l'impact cumulatif du type d'agriculture sur les performances

Exploration en cours

→ Rechercher régularités & singularités dans la sensibilité de l'attractivité de l'AC à l'horizon de revenu / dynamique du différentiel de performances

6) Synthèse des résultats (rappel)

Diagnostic régional	Evaluation CT prototypes	Modèle

Facteurs diversité SC ? → Durabilité SC ? → Durée ↗ performances en AC ? → Données utilisables modèles ? → Attractivité = f(t) ?

Méthode reproductible de diagnostic exploratoire à une échelle régionale

AC ↗ performances agronomiques la 2ème année mais rentabilité équivalente sur 2 ans car ↗ coûts production

- Territoire>parcelles>EA
- Enjeux durabilité contrastés
- Compromis entre objectifs .

Attractivité AC ↗ avec horizon de revenu considéré

Sensibilité variable à contexte éco. & effet cumulatif du type d'agriculture

Points de renforcement de l'analyse

1 **Diagnostic régional**
- Contextes de non-accessibilité au marché
- Aspects flexibles, évolutifs, dynamiques des SC
- Variabilité temporelle des performances
- Changement d'échelle (impact environnemental)

2 **Evaluation prototypes**
- Prototypes intermédiaires
- Sensibilité des performances aux variations de contexte
- Mesure des états de milieu / plante

3 **Exploration modèle**
- Autres options techniques à LT (thé, terrasses…)
- Intégration du risque

Perspectives pour le développement

→ Reconstruire des niches d'innovation / intervention

DIAGNOSTIC Typologies + Performances
PROTOTYPES Contextes + Performances
MODELES Horizons temps Scénarios

NICHE D'INNOVATION — NICHE D'INTERVENTION
Opportunités & contraintes de contexte
Objectifs d'innovation — Objectifs d'intervention
Ciblés spatialement, temporellement & socialement

Scénarios d'innovation
- Systèmes techniques
- Durée de temps
- Acteurs
- Contexte

Scénarios d'intervention
- Information / formation
- Dispositifs
- Accès aux techniques
- Conversion par étape ?

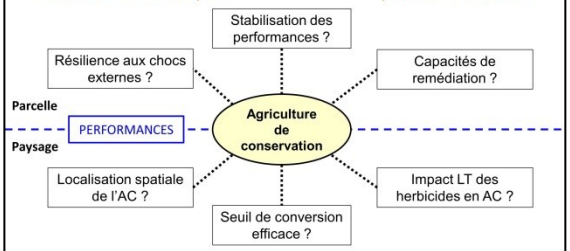
ACTEURS ⇄ CONTEXTE

PROCESSUS NEGOCIES D'INNOVATION

Nouvelles questions de recherche

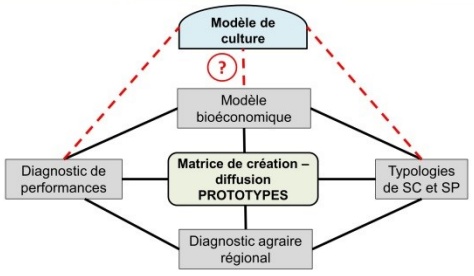
Dans quelles conditions et au bout de combien de temps ?

Quels systèmes et quels processus associés ?



Comment maximiser l'impact environnemental positif attendu de l'AC ?

Nouvelles questions de recherche



? Evaluation *ex-ante* à l'échelle du paysage de l'impact environnemental de prototypes de SC en phase de conception-évaluation simultanée ?

***Ex-ante* agronomic and economic assessment of cropping systems under smallholder farming: The case of conservation agriculture in mountainous humid tropics (Northern Vietnam)**

Keywords: sustainability, multicriteria analysis, typology, no-tillage, sloping land

The global need for further agricultural intensification makes necessary to identify contexts and options for sustainable intensive land uses to develop. This question is crucial under contexts of smallholder farming and high pressure on natural resources, such as in Asian humid tropics. In this region conservation agriculture (CA) is considered a leeway towards sustainable intensification. Within this context, our work aimed at preliminary assess to which extent CA fits the needs and constraints of smallholder farmers in a mountainous region where the high level of pressure on natural resources adds-up to a high poverty rate.

We implemented a diagnosis of sustainability gaps associated with the regional diversity of maize based agricultural systems on sloping land. We applied an original methodological approach combining diverse classification tools. We identified contrasted types of farming and cropping systems for management practices, performances and sustainability issues. The local diversity in maize cropping systems resulted from multi-scale interactions between territory-related factors, farm/farmer characteristics and field biophysical conditions. Territory-related factors were of prevailing importance over plot biophysical conditions and farm/farmer related characteristics to drive diversity of cropping systems.

We subsequently investigated to which extent data collected at CA-demonstration sites can be used to assess performances of CA-based cropping system prototypes over a 2-year period. Within the context of our study, CA associated with sufficient fertilization levels did not depress yields the first year after conversion. The second year, CA significantly increased maize productivity and agronomic efficiency. Such improvement of agronomic performances was not sufficient to ensure better economic performances than conventional agriculture over two years, due to the increase in production costs associated with transition to CA.

Main scientific perspectives from our work include (i) coupling CA-demonstrations with modeling to account in cropping system evaluation for processes driving their performances across variations in biophysical and economic conditions (ii) assessment of CA capacity to buffer variability in cropping system performances. Main implication for CA-based sustainable intensification in tropical humid highlands of Vietnam is the need to tailor technical proposals to the identified diversity of agricultural systems. To make conversion to CA worth for farmers within a period of two years, a major assumption is the requirement for cover plant valorisation, implementation of stepwise transition to CA, and/or tailoring incentives to support smallholder farmers in overcoming costs associated with conversion to CA.

Evaluation agro-économique *ex-ante* de systèmes de culture en agriculture familiale : Le cas de l'agriculture de conservation en zone tropicale humide de montagne (Nord Vietnam)

Mots clés : durabilité, analyse multicritère, typologie, SCV, pentes

Le besoin d'une intensification accrue des systèmes agricoles rend nécessaire l'identification des contextes et options permettant à des modes de mise en valeur intensifs et durables de se développer. Cette question est cruciale dans des contextes de petite agriculture familiale et de pression élevée sur les ressources naturelles, dont les zones tropicales humides d'Asie constituent un exemple typique. Dans cette région, l'agriculture de conservation (AC) est considérée comme un moyen de parvenir à cet objectif. Dans ce contexte, notre travail avait pour objectif d'évaluer dans quelle mesure l'AC peut constituer une réponse efficace et adaptée aux contraintes et besoins de petits producteurs familiaux dans une région montagneuse caractérisée par une forte pression sur les ressources naturelles et un taux de pauvreté élevé.

Nous avons d'abord effectué un diagnostic des facteurs critiques de durabilité associés à la diversité régionale des systèmes agricoles conventionnels incorporant une production de maïs sur pente. Nous avons développé une approche originale combinant différentes méthodes d'analyse multivariée et de classification. Cette approche nous a permis d'identifier des types de systèmes agricoles aux performances contrastées en termes d'atteinte d'objectifs de durabilité. Les caractéristiques territoriales à différentes échelles, de l'écorégion au village, ont été identifiées comme prévalant sur les caractéristiques biophysiques des parcelles et l'accès aux moyens de production à l'échelle de l'exploitation pour expliquer la diversité des systèmes de culture sur pentes.

Nous avons ensuite exploré dans quelle mesure des données collectées sur des sites de démonstration en AC pouvaient être utilisées pour évaluer les performances de prototypes de systèmes de culture en AC. L'AC pratiquée à un niveau de fertilisation suffisant n'a pas eu d'impact négatif sur les rendements la première année après conversion. Elle a significativement amélioré productivité agricole et efficacité agronomique la seconde année après conversion. Toutefois, cette amélioration des performances agronomiques n'était pas suffisante, aux conditions économiques actuelles, pour assurer une meilleure rentabilité économique que l'agriculture conventionnelle sur un horizon de deux ans, du fait de l'augmentation des coûts de production associée au passage à l'AC.

Les perspectives scientifiques issues de ce travail comprennent (i) l'utilisation des données issues de dispositifs de démonstration dans une perspective de modélisation pour prendre en compte, dans l'évaluation des systèmes de culture, les processus à l'origine de leur performances en fonction des variations de contexte biophysique et économique et (ii) l'évaluation de la capacité de l'agriculture de conservation à tamponner la variabilité des performances des systèmes de culture. La principale implication pratique pour l'intensification durable de l'agriculture dans le contexte du Nord Vietnam est la prise en compte de la diversité des systèmes agricoles dans le prototypage et la diffusion de systèmes de culture innovants. Une nouvelle hypothèse est qu'il est nécessaire d'envisager la valorisation au moins partielle des plantes de couverture, une conversion par étapes et/ou des incitations permettant de compenser l'augmentation de coûts générée par le passage à l'agriculture de conservation pour que celle-ci devienne économiquement attractive pour de petits producteurs familiaux dans un horizon de deux années.