

Evaluation de systèmes de culture innovants conçus par des agriculteurs: un exemple dans la Pampa Argentine

Salembier C.^{1,2}, Meynard J-M. ³

¹ INRA Unité Expérimentale Alénya Roussillon, Domaine du Mas Blanc, F-66200 Alénya

² ISTOM Ecole supérieure d'agro-développement international, 32 Boulevard du port, F-95094 Cergy Pontoise CEDEX

³ INRA Département Sciences pour l'Action et le Développement (SAD), Bâtiment EGER, Campus de Grignon, F-78850 Thiverval-Grignon

Correspondance : chloe.salembier@supagro.inra.fr

Résumé

La R&D agricole considère aujourd'hui les innovations de terrain comme des sources d'idées et de références pour améliorer durablement les modes de production. La « traque de systèmes innovants » et l'évaluation de ces systèmes pour définir les plus performants du point de vue économique et agri-environnemental nécessitent cependant un travail de mise au point méthodologique, auquel cet article vise à contribuer. L'étude est réalisée dans la Pampa argentine, où depuis 20 ans se développe un système basé sur une quasi-monoculture de soja tolérant au glyphosate (Round-up Ready), associé au semis direct. Les nuisances écologiques liées à la monoculture et à l'emploi croissant de pesticides justifient particulièrement de porter de l'intérêt aux pratiques alternatives. Nous avons enquêté des conseillers agricoles, des entrepreneurs de travaux agricoles (« contratistas ») et des producteurs, afin de décrire le système de culture dominant et de débusquer des systèmes « hors norme ». 22 systèmes différant du système dominant à la fois par les pratiques et les objectifs des producteurs ont été classés en 5 types de logiques agronomiques, et évalués. Nous avons montré que des systèmes hors normes, qui empruntent parfois certains de leurs traits aux systèmes passés (travail du sol, lien avec l'élevage), mais qui sont innovants par la manière dont ils les combinent avec des options techniques originales (favorisant le potentiel de production des doubles cultures, ou la protection intégrée contre les bio-agresseurs) sont mis en œuvre par certains producteurs. L'évaluation de ces systèmes innovants s'est appuyée sur des indicateurs standardisés, mais aussi sur les critères d'évaluation de leurs systèmes que se donnent les producteurs (par exemple : risque économique, retour sur investissement, développement d'adventices résistantes au glyphosate). L'enseignement majeur de ce travail est qu'une traque organisée permet, même dans une région en apparence homogène, de capter des systèmes alternatifs, dont certains s'avèrent très prometteurs.

Mots-clés : sojización, indicateurs, soja, monoculture, adventices résistantes aux herbicides, glyphosate, adventices résistantes au glyphosate, diversification des cultures, allongement des rotations, réduction des pesticides, traque des innovations.

Abstract: Evaluation of innovative cropping systems designed by farmers: an example in the Argentinean Pampa

Today, the agricultural research and development consider grass roots innovations as a source of ideas and references to improve sustainably the methods of production. "Tracking innovative cropping systems" and their evaluation, to define their economical and agri-environmental performances, imply to work on the clarification of a methodology, to which this article is going to contribute. The study is led in the Argentine Pampa, where have been developed, since 20 years, cropping systems based on a nearly-monoculture of soybean tolerant to glyphosate (Round-Up Ready) associated to direct sowing.

Ecological damages linked to monocultures and increasing use of pesticides justify the interest to search for other methods of production. We have investigated farmers, contractors of agricultural services (“contratistas”) and agricultural advisers in the aim to describe a “dominant cropping system” and to identify “out of the standard systems”. 22 systems differ from the dominant cropping system, regarding their practices and productive objectives. They have been classified in 5 types of agronomic logics, and have been evaluated. We have shown that “out of the standard” cropping systems that can borrow characteristics from old systems (tillage, link with cattle farming), but that are innovative in the way they combine these characteristics with original technical options (intercrops; integrative pest management), are developed by some farmers. The evaluation of these innovative cropping systems is based on standardized indicators, but also criteria cited by producers to evaluate their systems (economical risk, return on investment, development of weeds resistant to glyphosate). The main lesson of this work is that, even in an apparently homogeneous region, an organized track makes it possible to find other systems, and some can prove to be very promising.

Keywords: sojización, indicators, soybean, monoculture, herbicide resistant weeds, glyphosate, glyphosate resistant weeds, crop diversification, longer rotations, pesticide use reduction, tracking innovations.

Introduction

En agriculture, les praticiens constituent une importante source d’innovations : si les innovations variétales et agrochimiques sont le plus souvent issues de grandes firmes, parfois multinationales, l’émergence de systèmes de culture ou d’élevage innovants a souvent été le fait d’agriculteurs. Comme le soulignent Goulet *et al.* (2008), « *les agriculteurs ajustent en permanence leur action et leur connaissance, ils s’adaptent à des changements et parfois créent des nouveautés techniques et organisationnelles qui peuvent alors être reprises par d’autres* ». Les théoriciens de l’agroécologie mettent en avant cette capacité d’innovation des agriculteurs, insistant sur leur aptitude à combiner savoirs traditionnels et connaissances d’origine scientifique dans la conception (Altieri *et al.*, 2011). En France, les systèmes herbagers autonomes (Pochon, 2008) ou les techniques culturales sans labour (Goulet et Vinck, 2012) constituent des exemples emblématiques d’innovations imaginées par des agriculteurs, et seulement ensuite étudiées par des chercheurs.

On considère aujourd’hui de plus en plus souvent ces innovations de terrain comme des ressources pour favoriser une évolution plus massive des pratiques agricoles. Ainsi, dans le cadre du plan Ecophyto 2018, le ministère de l’Agriculture a suscité la mise en place d’un réseau de « 1000 fermes de production de références et de démonstration », visant à « *accumuler des données agronomiques, environnementales et économiques sur ce qu’il est possible de faire en terme de réduction de l’usage de produits phytosanitaires et de les partager avec les autres exploitations agricoles* » (Ministère de l’Agriculture 2010). Petit *et al.* (2012) illustrent, dans le cadre de la phase test de ce réseau, la richesse potentielle et la diversité des solutions imaginées et mises en œuvre par les agriculteurs pour réduire les pesticides. D’une manière générale, repérer les innovations de terrain, les évaluer pour déterminer les plus intéressantes (impacts sur les critères ciblés par l’agriculteur-concepteur, mais aussi sur les critères non ciblés), et définir leurs conditions d’extrapolation, constituent une manière de construire des références sur les systèmes innovants (Petit *et al.*, 2012 ; Meynard, 2012).

L’objectif de cet article est de rapporter les modalités et les résultats d’une telle « traque de systèmes innovants » réalisée en Argentine, dans la Pampa, dans une région où on assiste depuis 20 ans à l’irrésistible développement d’un système basé sur une quasi-monoculture de soja tolérant au glyphosate (Round-up Ready), associé au semis direct.

Nous nous proposons de revenir plus particulièrement sur la manière dont des indicateurs de performances économiques et agri-environnementales ont été utilisés pour identifier les systèmes alternatifs les plus intéressants.

1. La sojización de la Pampa Argentine et la démarche de traque des systèmes de culture innovants

1.1 Le système de culture « dominant » : contexte d'émergence et logique agronomique

Les années 2000 ont vu les surfaces en soja augmenter en Argentine de 8 à 20 millions d'hectares (MAGyP, 2011), au détriment des prairies (Carreño *et al.*, 2010 ; Rearte, 2011) et des grandes cultures de diversification (blé, tournesol, maïs, sorgho) (MAGyP, 2011). En région Pampéenne, où ce processus de « sojización » a été le plus massif, des rotations très courtes, voire des monocultures de soja, se sont développées. Cette évolution n'a été possible qu'avec l'apparition et la diffusion à grande échelle du paquet technologique « soja RR¹, glyphosate et semis-direct », dont l'usage a complètement révolutionné la cohérence agronomique et organisationnelle des systèmes de culture.

Quels avantages agronomiques, organisationnels et économiques présente ce paquet technologique pour expliquer un phénomène d'une telle ampleur ? L'introgession du caractère transgénique « RoundUp Ready » permet au soja d'acquérir une résistance au principe actif du glyphosate (N-(phosphonométhyl)glycine) ; les adventices peuvent ainsi être maîtrisées sur la parcelle à moindre coût par des traitements glyphosate de post-levée. Libéré de la contrainte adventice, le semis-direct peut être aisément pratiqué. Cette technique permet le maintien, en couverture du sol, d'un mulch de résidus des cultures précédentes, qui (i) réduit l'évaporation (ce qui est très avantageux pour une culture d'été), (ii) limite les phénomènes d'érosion (en terrains pentus, exposés ou présentant une mauvaise structure du sol) ; (iii) améliore la teneur en humus des horizons superficiels du sol, ce qui favorise la mise en culture de zones de faible aptitude agricole, et (iv) augmente la biomasse microbienne et la micro et méso faune du sol. L'abandon du travail du sol a participé à une diminution des coûts de production (emplois, carburant) (Tomei et Upham, 2009) et a permis de diviser par trois le temps nécessaire à l'implantation d'une culture (Gonzales Montaner, 2002). La culture de soja a fait l'objet de nombreux travaux de recherche, ses quelques ravageurs potentiels sont bien connus et peuvent aisément être contrôlés par une large gamme de produits phytosanitaires de synthèse.

Aujourd'hui, les avantages agronomiques et organisationnels de cette culture sont confortés par l'évolution, sur les marchés mondiaux, de la demande de tourteaux et farines de soja, ainsi que d'huile de soja raffinée (Giancola *et al.*, 2009). Le soja apparait comme une culture économiquement peu risquée, la recherche agronomique ayant développé de nombreux cultivars adaptés à une large gamme de fenêtres climatiques (variation de la durée des cycles entre culture principale et culture dérobée, différences inter-régionales). Ces avantages ont largement été identifiés par les producteurs argentins. La sojización de la Pampa a été décrite comme une véritable révolution agricole (Albaladejo, 2011), largement portée par de nouveaux acteurs : (i) les pools de semis², méga entreprises, généralement financées par des capitaux extérieurs à l'agriculture, qui font cultiver des surfaces louées à l'année supérieures à 50 000 hectares (et jusqu'à 300 000 ha), et (ii) les contratistas, prestataires de services, largement mobilisés par les pools de semis, disposant d'une partie ou de l'ensemble du parc de machines agricoles.

¹ RoundUp Ready

² Ces entreprises constituent l'archétype d'une « agriculture sans agriculteurs » (Hernandez, 2007)

Aujourd'hui, la littérature, les chercheurs et acteurs de la filière agricole témoignent du développement de systèmes de culture caractérisés par un retour chaque année de la culture du soja sur une même parcelle, et mis en place sur une part considérable des surfaces agricoles de la Pampa argentine. Ces systèmes ultra simplifiés sont portés par des producteurs (pools de semis ou agriculteurs traditionnels) dont l'objectif premier est d'atteindre une rentabilité économique élevée à court terme : les interventions techniques sont uniformisées, définies comme des « recettes », et souvent mises en œuvre par des contratistas.

Les producteurs enquêtés, les experts et la littérature présentent les avantages incontestables de ces systèmes de culture ultra-simplifiés, mais soulignent aussi parfois les impacts environnementaux et sociaux générés à moyen et long terme. Nous nous concentrons ici sur les impacts agri-environnementaux, mais ce phénomène a également des impacts sociaux importants sur l'évolution des campagnes argentines (Hernandez, 2009 ; Hernandez, 2007 ; Albaladejo, 2011, Chaxel *et al.*, 2011). La littérature signale particulièrement (i) la diminution de la diversité de la faune et de la flore locales et des services écosystémiques associés, liées à la réduction de la diversité des habitats (diminution des prairies et rotations) (Carreño et Viglizzo, 2010), (ii) une augmentation des risques sanitaires et de la vitesse de dispersion des adventices et ravageurs, liées à la monoculture, (iii) un accroissement des émissions de gaz à effet de serre, lié au retournement des prairies permanentes et à la mise en culture des surfaces correspondantes (Viglizzo *et al.*, 2010), et (iv) un accroissement de l'usage des pesticides et des risques d'écotoxicité qui y sont liés (Carreño et Viglizzo, 2010).

Sur la parcelle, l'usage répété du glyphosate, deux à quatre fois sur le soja et une à deux fois en interculture, engendre le développement d'adventices résistantes difficilement contrôlables et impliquant l'usage d'herbicides complémentaires (Johnson *et al.*, 2009, Caviglia *et al.*, 2004 ; Tomai et Upham, 2009 ; Bonny, 2011). Pour implanter et entretenir une culture en semis direct, il faut nécessairement utiliser plus de pesticides qu'en culture conventionnelle (Carreño et Viglizzo, 2010), ce qui engendre une plus grande dépendance de l'exploitant aux produits phytosanitaires. Certains auteurs (Studdert *et al.*, 2009 ; Studdert, 2003) soulignent que les résidus de soja n'assurent pas un apport en matière organique conséquent : à moyen terme en monoculture, les taux de carbone organique du sol diminuent, engendrant une dégradation des propriétés physico-chimiques et biologiques du sol (Caviglia et Andrade, 2010). Cette dégradation des sols est propice à la lixiviation de nutriments et pesticides dans les eaux souterraines (Elverdin *et al.*, 2011).

Alors que la suppression du travail du sol est sensée réduire l'érosion, celle-ci subsiste sous soja, dont le feuillage protège incomplètement le sol des agressions de l'eau et du vent (Tomei et Upham, 2009 ; Elverdin *et al.*, 2011) : le Rio de La Plata reste aujourd'hui très chargé en sédiments ! Des agriculteurs et conseillers signalent aussi que la pratique répétée du semis direct sans recours au travail du sol peut engendrer des phénomènes de compaction susceptibles de se répercuter sur les rendements. Enfin, ces mêmes témoignages et les documents de l'INTA soulèvent que le maintien d'un mulch permanent à la surface du sol peut favoriser le développement de maladies et de ravageurs dont les plus nuisibles aujourd'hui sont les cloportes (*Armadillidium vulgare*) et les limaces (*Milax gagates*, *Deroceras laeve*, *Deroceras reticulatum*) (Gravano *et al.*, 2011 ; Saluso *et al.*, 2005 ; Carmona D.M. et Tulli M.C., 2006).

Dans notre zone d'étude (le partido de Balcarce, au sud de Buenos Aires), la plupart des acteurs de la R&D agricole rencontrés s'accordent pour décrire un système de culture qui, selon eux, occupe une grande partie des surfaces cultivables, caractérisé par une rotation de trois cultures sur deux ans : [soja]/[blé ou orge + soja]. Nous qualifierons ce système de « dominant ».

Le soja revient chaque année sur chaque parcelle : soit un soja de cycle long (de novembre à mai), soit un soja en culture dérobée après une céréale (de fin décembre-début janvier à mai-juin). Les itinéraires techniques courants de ce système dominant nous ont été décrits dans des termes très proches par différents acteurs de la filière (conseillers, chercheurs, agriculteurs). La conduite de chaque culture est très intensive en intrants.

Les semis du blé (ou de l'orge) et du soja de cycle long sont précédés d'une « jachère chimique » de quelques mois durant laquelle sont appliqués 3 herbicides (dont deux glyphosates), pour limiter la pression adventice avant les semis. Durant la culture du soja de cycle long, deux applications de glyphosate et une de 2,4DB sont aussi réalisées, complétées en préventif par une application de leurres hormonaux (contre cloportes et limaces) et d'un insecticide (cyperméthrine). Sur le soja de cycle court seules trois applications de glyphosate sont systématiquement réalisées entre le semis et le mois de mars. Des deux cultures de soja, seule celle de cycle long est fertilisée, le soja de cycle court bénéficiant des résidus de fertilisation de la céréale qui le précède. Une à deux applications d'herbicides sont réalisées durant le cycle de la céréale et une application systématique de fongicide, généralement par voie aérienne.

Ce système, caractéristique de notre région d'étude, est plus diversifié que ceux du nord de l'Argentine où dominent des monocultures de soja (Dominguez *et al.*, 2005 ; Miranda *et al.*, 2011).

1.2 La démarche de traque aux systèmes de culture innovants

Ce travail part de l'hypothèse que malgré l'impression générale d'un développement hégémonique du système de culture « dominant », il existe dans la Pampa argentine des producteurs qui développent des systèmes de culture alternatifs (qualifiés de « hors norme » dans cet article), dont certains n'ont pas les points faibles, au niveau des impacts agri-environnementaux, du système de culture dominant.

Ces systèmes de culture hors norme ne font pas l'objet d'études spécifiques de la part des chercheurs argentins, ils sont peu présents dans la littérature, dans laquelle nous trouvons essentiellement des informations relatives au système dominant. Trouver des producteurs développant des systèmes de grande culture alternatifs a nécessité de mobiliser une méthodologie spécifique. Nos correspondants de l'INTA³ (organisme de R&D agronomique argentin) nous ont introduits auprès de conseillers, qui, à leur tour nous ont indiqué des producteurs pratiquant, selon eux, des systèmes différents du système dominant. Ces producteurs nous en ont indiqué d'autres, et, de proche en proche, il a été possible d'en identifier certains qui développaient effectivement des pratiques alternatives. La démultiplication des réseaux nous a orientés vers une grande diversité de producteurs : de petites exploitations de 30 hectares aux grandes exploitations de 10 000 hectares. La diversité de l'échantillon étudié nous a permis de constater que le paquet technologique [soja RR, glyphosate, semis direct] pouvait être intégré dans des systèmes de culture et des exploitations d'une grande diversité. Tous les producteurs identifiés par des tiers et rencontrés n'ont pas été étudiés de manière approfondie. La sélection des exploitations pour l'évaluation a suivi plusieurs étapes (Figure 1).

Chaque premier entretien avec un producteur identifié par un tiers comme pratiquant des systèmes de culture « hors-norme » visait à décrire les pratiques et à comprendre la logique agronomique de leur mise en œuvre. Suite à ce premier entretien, le choix était fait de poursuivre ou non l'étude du cas : n'ont été retenus à l'issue de ce premier entretien que les systèmes dont le producteur (i) affirmait qu'ils répondaient à des objectifs autres que ceux de l'optimisation du résultat économique à court terme, et (ii) justifiaient par ces objectifs particuliers des pratiques (longueur de la rotation, réduction des pesticides, etc.) s'éloignant de celles du système dominant.

Les producteurs dont les pratiques ont retenu notre attention ont été rencontrés de nouveau, chez eux ou au champ, pour décrire précisément les pratiques associées aux systèmes sélectionnés, et pour approfondir la compréhension de leurs choix culturaux. Les entretiens se sont répétés jusqu'à aboutir à la finesse de description des pratiques nécessaire au calcul des indicateurs retenus (voir infra) et à une compréhension des raisons de leur mise en œuvre. En définitive, 22 systèmes de culture chez 15 producteurs ont été retenus pour être évalués.

³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

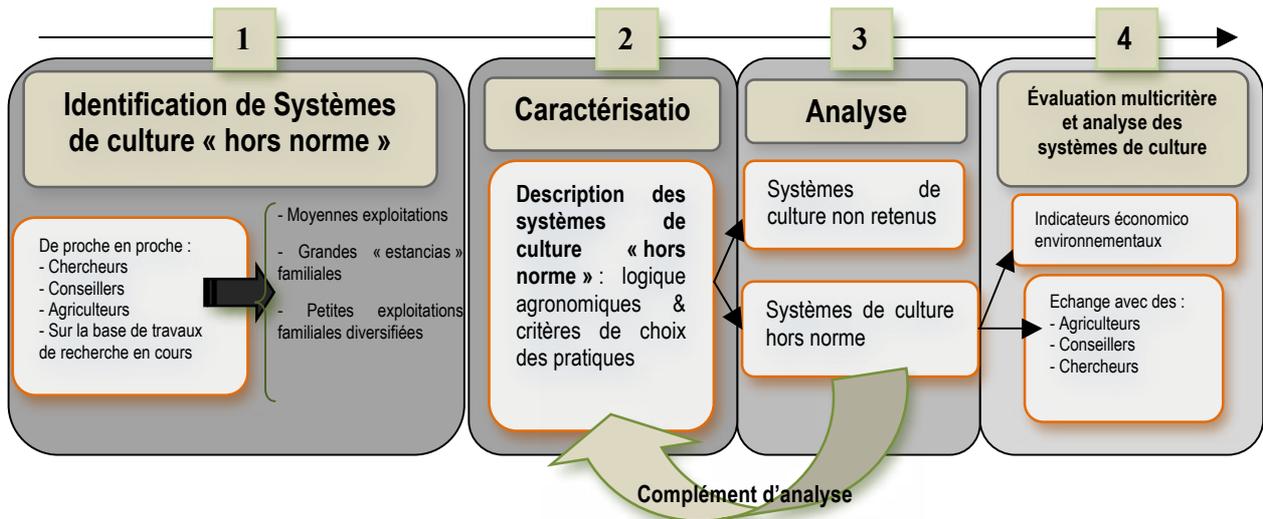


Figure 1 : Méthode de traque et d'analyse de systèmes de culture hors-norme.

2. L'analyse et l'évaluation des systèmes de culture « hors norme » - quelles performances en référence au système dominant?

2.1 L'analyse des systèmes de culture « hors-norme » identifiés

Les 22 systèmes de culture de l'échantillon ont été regroupés par types (à l'aide du croisement de deux méthodes statistiques : l'Analyse en Composantes Principales et la Classification Ascendante Hiérarchisée). Cette typologie a été réalisée sur la base d'une sélection au préalable des variables discriminantes les plus représentatives des cohérences agronomiques de ces différents systèmes de culture : (i) nombre d'années de prairie temporaires dans la rotation ; (ii) recours au travail du sol à un moment ou à un autre de la rotation ; (iii) fréquence de retour du soja dans la rotation ; (iv) nombre d'application de glyphosate en moyenne par an ; (v) nombre d'applications de pesticides (hors herbicides) en moyenne par an ; (vi) nombre d'espèces différentes en moyenne dans la rotation sur 5 ans ; (vii) fréquence d'intégration de certaines cultures (pomme de terre, cultures fourragères annuelles, prairies multi espèces).

Cinq types de systèmes de culture ont été distingués à l'issue de ce regroupement, qui répondent chacun à des logiques agronomiques différentes (Figure 2). Certaines des exploitations étudiées ont un schéma productif mixte : productions en grande culture et élevage.

Dans ces cas-là, la gestion de l'alimentation du troupeau est intimement associée à la gestion de la rotation des grandes cultures, ainsi sur une même parcelle peuvent entrer en rotation des céréales, oléagineux et des cultures fourragères.

Le type 1 regroupe des systèmes proches du système dominant (absence totale de travail du sol, forte fréquence du soja dans la rotation, forte utilisation de pesticides). Seuls un allongement des rotations et la pratique de cultures en relais (semis du soja dérobé avant récolte de la céréale) les distinguent. Le type 2 est caractérisé par une rotation plus longue et diversifiée (avec maïs, tournesol, colza, et moins de soja), la pratique d'un travail du sol occasionnel et une réduction de l'usage de pesticides. Dans le type 3, on retrouve une rotation courte, mais le soja dérobé est remplacé par une culture fourragère (avoine, ray-grass) de courte durée, ce qui permet de réduire les pesticides ; un travail du sol est régulièrement pratiqué notamment lorsque le sol a été compacté par le piétinement des animaux lors du pâturage des cultures fourragères. Dans le type 4, la rotation est allongée et diversifiée, entre autres par la culture régulière (tous les 5 ans environ) de pommes de terre ; le sol est labouré avant et après cette culture. Du fait du travail du sol et de l'allongement de la rotation, l'usage de glyphosate est réduit,

mais les exigences de la pomme de terre maintiennent élevées les quantités de fongicides et insecticides utilisées. Enfin, le type 5 est le plus proche des systèmes antérieurs à la sojización : la rotation de grandes cultures, relativement diversifiée, est régulièrement coupée par une prairie pluriannuelle de 2 à 5 ans. L'usage de pesticides y est globalement faible.

Classes de systèmes de culture	Durée moyenne de la rotation (ans)	Espèces cultivées	Fréquence, sur 5 ans de retour du soja dans la rotation	Nombre moyen d'applications de glyphosate par an	Nombre moyen d'applications de pesticides (hors herbicides) par an	Recours au travail du sol
Système dominant	2	soja, blé, orge	5	4	2	semis-direct
Type n°1 - proche système dominant	3,3	soja, blé, orge, maïs, tournesol	3,8	4,1	3,2	semis-direct
Type n°2 - grandes cultures ; rotation allongée	4,3	Maïs, soja, tournesol, blé, orge, colza	3	3,1	1,1	semis-direct (recours occasionnel au travail du sol)
Type n°3 - grandes cultures et fourrages annuels	2,2	soja, avoine, ray grass, blé, orge	2,6	2,3	0,6	Travail du sol superficiel tous les ans ou deux ans
Type n°4 - grandes cultures avec pomme de terre	5	pomme de terre, soja, blé, orge, colza, maïs, tournesol	2,4	2	4	semis-direct et travail du sol profond tous les 5 ans
Type n°5 - grandes cultures et prairie pluriannuelle	8	soja, maïs, tournesol, prairies pluri spécifiques, sorgho, blé, orge	1,7	1,4	0,7	semis direct et travail du sol superficiel 5 à 6 ans.

Figure 2 : Principales caractéristiques agronomiques du système de culture dominant et des 5 types de systèmes de culture étudiés.

2.2 Les critères d'évaluation des performances des systèmes de culture

Le choix des indicateurs (Figure 3) retenus pour évaluer les performances des systèmes de culture résulte de deux préoccupations : (i) pouvoir évaluer les performances environnementales des systèmes de culture étudiés, en référence à celles du système de culture dominant ; (ii) pouvoir évaluer les performances des systèmes de culture selon les critères mis en avant par les producteurs dans le choix de leurs pratiques culturales. Au travers du logiciel CRITER⁴, dans lequel il est possible d'intégrer différentes caractéristiques pédoclimatiques, nous avons pu adapter les calculs de la méthode INDIGO (Bockstaller et Girardin, 2008) à notre zone d'étude, pour évaluer différentes performances environnementales. Nous évoquons dans cet article les résultats des calculs de l'indice de succession culturale, la volatilisation de NH₃, les émissions de N₂O et le lessivage de NO₃ ainsi que de la consommation énergétique générée par chaque système de culture.

⁴ Logiciel qui calcule les indicateurs de Masc (Sadok *et al.*, 2009), dont la batterie issue d'Indigo (Bockstaller et Girardin, 2008).

Indicateurs	
Econom.	Valeur Ajoutée Brute
	Retour sur investissement
	Risque économique
	IFT (Indice de Fréquence de Traitement) total
	IFT herbicide
	IFT autres qu'herbicides
	Pression d'adventices résistantes
Environnementaux	Nombre de cultures en moyenne sur 5 ans
	Indice de Succession Culturelle INDIGO
	Indicateur de teneur en carbone organique
	Volatilisation de NH ₃
	Emission de N ₂ O
	Lessivage de NO ₃
	Consommation énergétique

Figure 3 : Liste des indicateurs utilisés pour évaluer les performances des systèmes de culture étudiés.

Les autres indicateurs retenus visent à rendre compte des critères de choix des pratiques agricoles mentionnés par les producteurs lors des entretiens. A la plupart de ces critères, nous avons pu associer un indicateur de performance (Figure 4). Les indicateurs sont décrits plus précisément dans l'encadré n°1 en fin d'article.

Critères cités par les producteurs	Indicateur correspondant pour l'évaluation des performances
La maximisation de la rentabilité moyenne des cultures de la rotation	Valeur Ajoutée Brute /ha (VAB)
la maximisation du retour sur investissement	Retour sur investissement (RI)
La réduction des risques économiques	Indicateur Risque économique
Le maintien de la fertilité organique du sol à moyen/long terme	Indicateur de l'évolution du taux de carbone organique (ICO)
La réduction des populations d'adventices par la diversification des cultures	IFT désherbant (IFT Désher.) et présence d'adventices résistantes au glyphosate (Adv. Résist.)
La réduction de la pression des bio-agresseurs	IFT pesticides (hors herbicides) (IFT hors herbi.)
La maximisation de l'usage du sol	Indicateur d'occupation du sol (nombre de cultures implantées en moyenne sur 5 ans) (Nb. Cultures/5 ans)

Figure 4 : Critères mis en avant par les producteurs dans le choix de leurs pratiques et indicateurs de performance correspondant.

Les critères cités par les producteurs se différencient entre types de systèmes, et renvoient à des choix techniques spécifiques :

- « La maximisation de la rentabilité moyenne des cultures de la rotation » se concrétise par le choix d'espèces inscrites sur un marché porteur, dont le prix de vente est intéressant, ou d'espèces

fournissant un fourrage pour le troupeau ; tous les agriculteurs font référence à ce critère, qui apparaît logiquement comme majeur pour le choix des espèces cultivées ;

- « La maximisation du retour sur investissement » est un objectif mis en avant par les tenants du système dominant, qui réduisent les coûts de main d'œuvre et matériel en faisant appel aux contratistas, mais aussi par certains producteurs du type 3, qui y trouvent l'une des justifications de leur stratégie de réduction d'intrants;
- « La réduction des risques économiques » se traduit par différentes stratégies : dans le système dominant, la forte fréquence de retour du soja est justifiée par le fait que cette culture est considérée comme moins risquée que d'autres. Pour les types 2, 3 et 4, la diversification des cultures à la fois dans la rotation et sur l'assolement permet de réduire les risques liés à la commercialisation (prix plus ou moins variable selon les espèces, étalement des dates de vente favorable à la trésorerie) et aux variations climatiques (sensibilité au stress différente selon les espèces) ;
- « Le maintien de la fertilité organique du sol à moyen/long terme » justifie l'intégration dans la rotation de prairies temporaires et de céréales (blé, maïs) apportant des quantités de carbone au sol plus importantes que le soja ; ce critère est mis en avant par tous les producteurs qui adoptent des rotations plus longues et/ou diversifiées que celle du système dominant ;
- « La réduction des populations d'adventices par la diversification des cultures » est l'objectif explicite de la majorité des producteurs des types 2, 4 et 5, qui mettent en place des rotations relativement longues et diversifiées, permettant d'alterner les matières actives utilisées et d'éviter de favoriser tous les ans les mêmes espèces d'adventices ;
- « La réduction de la pression des bio-agresseurs » justifie l'alternance d'espèces différentes sur la parcelle pour rompre le cycle des maladies telluriques, mais aussi la pratique, le plus souvent occasionnelle, d'un travail du sol limitant la formation d'un mulch, qui favorise le développement de ravageurs (cloportes et limaces – voir partie 1.a.) (mis en avant par les agriculteurs des types 2, 4 et 5) ;
- L'objectif de « maximisation de l'usage du sol », mis en avant pour le système dominant et les systèmes de types 1 et 3, se traduit par la mise en culture de 2 espèces par an (culture principale et culture en dérobé – souvent du soja de cycle court, parfois une culture fourragère, avoine ou ray-grass), mais aussi par la mise en œuvre d'une rotation assurant une occupation du sol maximale (ex : [tournesol]/[Colza + soja de cycle court]).

Chaque producteur a hiérarchisé de manière différente ces critères ; dans un même type de système de culture, les différents producteurs avaient généralement les mêmes critères de choix. Certains critères cités par les producteurs n'ont cependant pas pu être évalués car cela aurait entraîné des coûts d'acquisition des données trop élevés dans le cadre de cette étude, ou parce qu'ils n'étaient abordables qu'à l'échelle du système d'exploitation. Il s'agit (i) du maintien de l'activité biologique du sol, (ii) de l'étalement du calendrier de travail ; (iii) de l'impact réel du passage du troupeau dans les parcelles agricoles (tassement du sol, consommation de résidus cultureux par les animaux, apports organiques).

3. Evaluation des performances des différents types de systèmes de culture « hors-norme »

Les résultats moyens des indicateurs sont présentés pour chaque type de système « hors norme », et pour le système dominant (en rouge), sur des graphiques de type « radar ». Sur ces radars, la meilleure performance est créditée de la note 1, la moins bonne de la note 0, les autres types de systèmes se positionnant entre 0 et 1 selon un calcul de proportionnalité. Les indicateurs INDIGO de lessivage de nitrate et d'émission d'ammoniac, peu élevés pour tous les types de systèmes n'ont pas été représentés sur les radars.

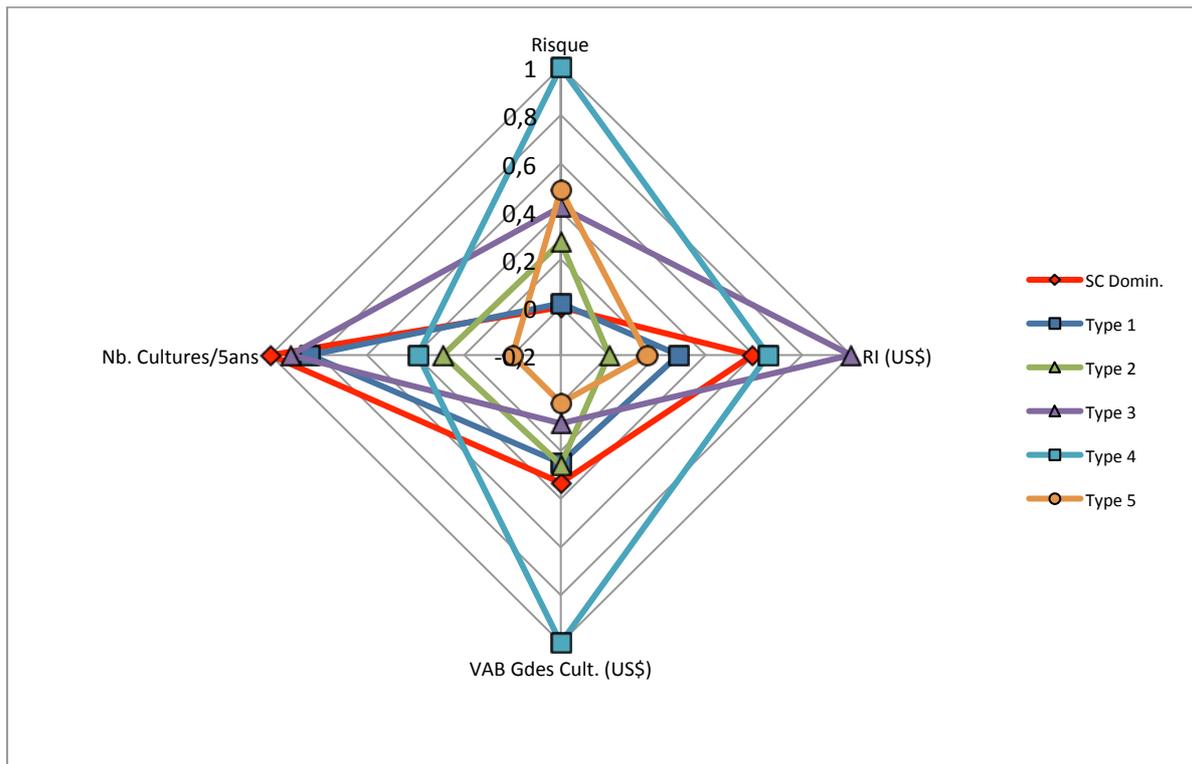


Figure 5 : Résultats des indicateurs de performances économiques du système de culture dominant et des 5 types de systèmes de culture. Les résultats des indicateurs ont été ramenés sur le graphique à une échelle de [0;1] ("1" étant le résultat le plus performant), les 5 types s'inscrivent dans les gammes de valeurs réelles suivantes: Risque (%) [36,4; 52,5]; Retour sur Investissement (US\$) [1,72; 2,66]; VAB grandes cultures (US\$/ha) [399,4; 515,3]; Indicateur d'occupation du sol (nombre de cultures implantées en moyenne sur 5 ans) [5,8; 7,5].

Le système de culture dominant, comme le recherchent les producteurs qui le mettent en œuvre, dégage l'une des meilleures valeurs ajoutées (à l'exception des systèmes de type 4, avec pomme de terre, voir plus loin). La maximisation de l'usage du sol (7,5 cultures implantées en moyenne sur 5 ans) et le retour sur investissement relativement élevé reflètent bien l'objectif de maximisation de la rentabilité économique à court terme de ces producteurs. Le résultat le plus surprenant reste que ce système est loin d'être le moins risqué, contrairement à ce qu'affirment les acteurs l'ayant décrit. En effet, il intègre tous les deux ans une culture de soja de cycle court, semée tardivement suite à une céréale (récoltée de décembre à début janvier), dont le rendement peut être fortement affecté par des déficits hydriques et des gelées de début d'automne (fin mars). Il n'en reste pas moins que les faibles coûts que le soja de cycle court engendre (pas de fertilisation suite à une céréale et « seulement » 3 applications de glyphosate durant le cycle) en font une culture d'opportunité, qui peut apporter un « bonus » après une céréale, pour une grande facilité de conduite. Cependant, si ce système de culture est économiquement performant, il est l'un des moins satisfaisants du point de vue des indicateurs agri-environnementaux : il se distingue en particulier par les IFT élevés et le développement généralisé des résistances au glyphosate. Le calcul de la teneur en matière organique à l'équilibre (indicateur ICO) confirme bien la littérature et les témoignages de producteurs concernant la relative faiblesse de la teneur en carbone organique des sols sur lesquels est pratiqué ce système.

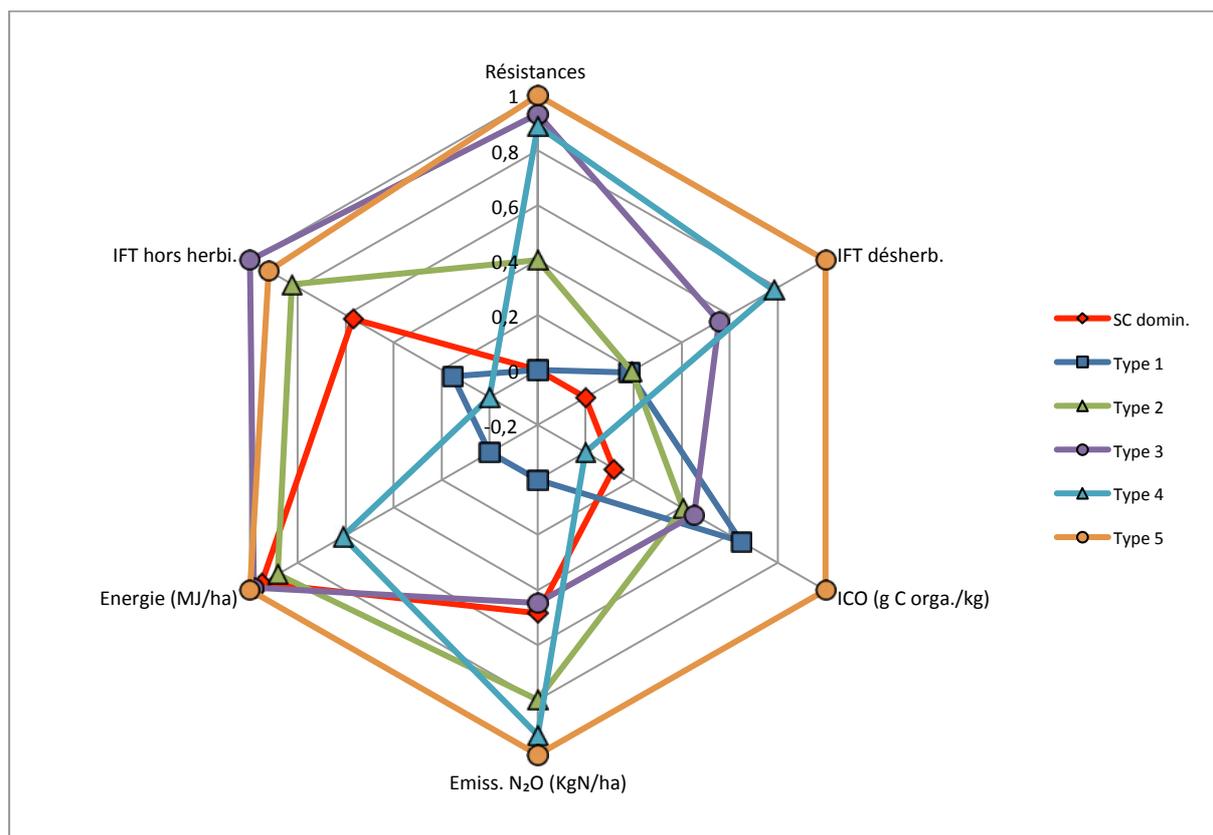


Figure 6 : Résultats des indicateurs de performance agri-environnementaux du système de culture dominant et des 5 types de systèmes de culture. Les résultats d'indicateurs ont été ramenés sur le graphique à une échelle de [0;1] ("1" étant le résultat le plus performant), les 5 types s'inscrivent dans les gammes de valeurs réelles suivantes: Résistances [importance des populations résistantes croissantes de 1 à 3] ; IFT hors herbicides [0,65 ; 4,73]; IFT herbicides [2,1 ; 6]; Energie(Mj/ha) [7 ; 9,1]; Émissions de N₂O (KgN/ha) [1,5 ; 3,2]; Indicateur de carbone organique (g C orga./Kg) [14 ; 16,1].

Les systèmes de culture du type 1 présentent des résultats proches de ceux du système de culture dominant pour la majorité des indicateurs économiques et agri-environnementaux.

Bien que plus diversifiés, ces systèmes de culture sont conduits de la même façon que le système dominant, avec des applications systématiques de pesticides en préventif, entraînant des IFT élevés (proches du centre du radar) et le développement de populations d'adventices résistantes au glyphosate. A cause des cultures très gourmandes en engrais azoté introduites dans la rotation (maïs, blé et parfois colza), les résultats du bilan énergétique et du retour sur investissement sont dégradés par rapport au système dominant. En revanche, les producteurs de ce type mettent en avant le fait qu'ils diversifient pour assurer un maintien de la fertilité organique de leur sol (notamment en intégrant du maïs dans la rotation et en ne travaillant jamais le sol) ; le résultat de l'indicateur ICO va dans le sens de leurs objectifs.

Les systèmes de culture du type 2, tous caractérisés par des rotations longues et diversifiées, ont un faible taux d'occupation du sol (nombre de cultures en moyennes sur 5 ans). La diversification des cultures limite le risque économique, par comparaison au système de culture dominant et à ceux du type 1 : les risques liés à une culture en particulier (le soja de cycle court ; le colza, culture d'introduction récente encore mal maîtrisée techniquement) sont atténués par la diversité des espèces présentes dans la rotation (4 à 5 espèces différentes), ce qui répond bien aux objectifs affichés par ces producteurs. L'allongement de la rotation contribue largement à l'amélioration des performances agri-environnementales : moins d'applications de glyphosate et de résistances, réduction de l'IFT hors

herbicides, des émissions de N₂O par rapport au système dominant et amélioration du bilan organique. Néanmoins, ces systèmes restent souvent intensifs en intrants. Dans la zone d'étude, « l'usage d'intrants en préventif est une pratique très enracinée » (Rosenstein *et al.*, 2007 cité par Iermano, Sarandon, 2011), ce qui contribue à dégrader le résultat de l'indicateur « retour sur investissement ».

Les systèmes de type 3, caractérisés par l'intégration de cultures fourragères annuelles (ray-grass ou avoine en culture dérobée après une céréale), présentent une VAB plus faible que celle des systèmes intégrant uniquement des céréales et des oléagineux. En revanche, l'association entre cultures et élevage diminue les risques, les prix de la viande et/ou de l'avoine commercialisés restant moins fluctuants que celui des cultures (données AACREA, N. Tagle, comm. pers). Les producteurs de ce type utilisent très peu d'intrants dans leurs parcelles, ce qui explique le niveau satisfaisant du retour sur investissement, et de la majorité des indicateurs agri-environnementaux (IFT faible, absence de résistances au glyphosate, émissions de N₂O limitées, etc.). Ces producteurs revendiquent de raisonner leurs traitements phytosanitaires selon les « strictes nécessités de la culture », en priorisant des interventions curatives, décidées après observation au champ. Ils limitent les apports de fertilisants azotés, notamment pour certains grâce à l'enfouissement des résidus de culture fourragère comme engrais verts. Un travail du sol superficiel après passage des animaux permet de résorber les tassements et contribue à la lutte contre les adventices.

Tous les systèmes de culture du type 4 intègrent une culture de pomme de terre dans leurs rotations. Bien que ces systèmes ne maximisent pas l'usage du sol (6,5 cultures en moyenne sur 5 ans), ils présentent une valeur ajoutée brute /ha élevée et un niveau de risque très faible. En effet, la pomme de terre n'est généralement pas cultivée par le producteur qui gère le système de culture, mais par une tierce personne (spécialisée dans la production de pomme de terre) qui loue chaque année une parcelle différente⁵. Cette culture génère donc une rente annuelle fixe, élevée (environ 850 US\$/ha) et non risquée dans la mesure où le prix de la location n'est pas indexé sur les rendements. Cette culture fortement fertilisée et impliquant nécessairement un travail du sol permet d'économiser des intrants sur les cultures suivantes, d'où un retour sur investissement élevé⁶. Les systèmes du type 4 présentent un résultat d'IFT herbicide de 0,6 et peu de résistances sur leurs parcelles.

Seul l'IFT (hors herbicides) est très élevé, les enjeux économiques autour de la pomme de terre et sa sensibilité à différents bio-agresseurs engendrant l'application préventive de nombreux pesticides. Le résultat d'ICO reste faible en comparaison aux autres types : l'implantation de la pomme de terre et la récolte (tous les 5 ans environ) requièrent des interventions lourdes de travail du sol qui accélèrent la minéralisation de l'humus. Ce travail du sol explique aussi le résultat médiocre de l'indicateur énergie (consommation de carburant).

Les systèmes du type 5, comme ceux du type 3, présentent les plus faibles résultats de VAB, car les prairies qu'ils intègrent (sur 2 à 5 années) génèrent une VAB par hectare beaucoup moins importante que les grandes cultures. Ils sont les moins risqués (après les systèmes du type 4), dans la mesure où ce sont ceux qui associent le plus longtemps sur leurs parcelles grandes cultures et élevage, dont les cours des produits fluctuent peu. Au plan agri-environnemental, le type 5 présente les meilleures performances pour tous les indicateurs. Ces systèmes sont très économes en intrants (pesticides et engrais), ce qui va de pair avec l'absence d'adventices résistantes dans les parcelles, des IFT très bas et de faibles émissions de N₂O. Les prairies temporaires de 2 à 5 ans permettent le maintien du plus haut taux de carbone organique dans le sol à long terme. Ces résultats coïncident bien avec les attentes des producteurs concernés.

⁵Pour des raisons sanitaires, la pomme de terre ne peut être mise en culture que tous les 5 ans sur une même parcelle

⁶Le calcul du retour sur investissement n'inclut pas l'année de mise en culture de la pomme de terre qui n'engendre aucun coût direct pour le producteur.

4. Quelles alternatives aux limites du système de culture dominant ? Sous quelles conditions ?

L'analyse des indicateurs économiques et agri-environnementaux suggère que certains des systèmes de culture « hors-norme » que nous avons débusqués pourraient représenter des alternatives au système de culture dominant, plus durables que celui-ci. Mais à quelles conditions ?

Certains de ces systèmes de culture associent étroitement les grandes cultures et la production d'aliments pour l'élevage. Ces systèmes mixtes présentent de réels avantages pour développer des rotations plus longues, avec des prairies temporaires, ou encore pour diversifier la gamme d'espèces à intégrer dans une rotation (maïs fourrager, sorgho, avoine, ray-grass). Cependant, au moment de l'étude, différents éléments du contexte argentin représentaient de réels freins au développement de tels systèmes : la concurrence pour le foncier entre grandes cultures et élevage, le manque de compétitivité des systèmes d'élevage extensifs et les restrictions à l'exportation de viande bovine (Reart, 2011). Depuis une vingtaine d'année de nombreuses exploitations se sont inscrites dans un processus de décapitalisation de leurs exploitations : en machines mais aussi en animaux. De nombreuses prairies extensives ont été abandonnées au profit de la mise en culture du soja, plus simple à gérer et offrant un rapide retour sur investissement. Le retour à des systèmes associant cultures et élevage supposerait une évolution forte des rapports de prix entre produits animaux et végétaux, une volonté de réinvestissement de capitaux vers la constitution de troupeaux et une ré-acquisition de compétences. La dynamique agraire actuelle symbolisée par le développement des pools de semis ne va pas dans ce sens, et une telle évolution ne pourra se faire que sur du très long terme, dans l'hypothèse d'une volonté politique forte.

Les systèmes de culture des types 2 et 4 n'incluent que des cultures de vente. L'allongement des rotations et la diversification des espèces permettent de réduire la pression de bio-agresseurs sur la parcelle, d'éviter l'apparition d'adventices résistantes au glyphosate⁷, de répartir les risques économiques et climatiques et de maintenir un niveau de fertilité organique élevé.

Quelle place y a-t-il aujourd'hui pour des cultures de diversification en Argentine ? La pomme de terre, pourtant initialement emblématique de la zone d'étude est aujourd'hui en déclin, compte tenu de l'instabilité des prix et de la croissance de cette activité dans des zones aux sols plus adaptés. Au moment de l'étude, tout comme la viande bovine, le blé et le maïs s'inscrivaient dans la politique de restriction aux exportations, pour stimuler la production porcine et ovine (maïs) et assurer la souveraineté alimentaire nationale (blé). L'orge s'est imposée comme culture de substitution au blé et trouve des débouchés commerciaux dans les industries brassicoles nationales et en tant que céréale fourragère à l'international. Le tournesol est aujourd'hui une culture de diversification intéressante, inscrite sur un marché stable (où la production de qualité oléique est récompensée de bonification sur les prix) et bien maîtrisée au plan technique. Ce n'est pas le cas du colza, les agriculteurs ayant choisi cette culture passent par une phase de « test technique au champ », durant laquelle ils expérimentent divers itinéraires techniques. Un intérêt de cette culture est fréquemment mis en avant : sa récolte précoce permet de semer le soja en dérobé plus tôt qu'après un blé ou une orge ; ce soja obtient ainsi de meilleurs rendements.

Sous réserve, là encore, d'une évolution des politiques agricoles actuellement très favorables au soja, l'allongement des rotations de céréales et d'oléo-protéagineux serait envisageable à plus courte échéance que le re-développement de l'élevage. Cependant, l'évaluation des systèmes de type 2 ne peut être considérée comme réellement satisfaisante, et des améliorations doivent être travaillées

⁷Sur l'ensemble des parcelles étudiées, moins le soja revient souvent, moins les producteurs emploient de glyphosate sur la rotation, et moins les producteurs signalent des résistances problématiques (voir sur les radars) les classements convergents de la note de résistance au glyphosate et de l'IFT herbicide, sachant que le glyphosate représente 80% des traitements herbicides.

notamment pour réduire l'usage de pesticides. L'analyse des innovations techniques mises en œuvre par certains producteurs offre certaines pistes. Ainsi, dans une zone où le semis direct est jugé incontournable, certains producteurs explorent la complémentarité d'une combinaison entre semis-direct et recours occasionnel au travail du sol. Cette combinaison leur permet de conserver, pendant une large part de la rotation, les bénéfices du semis-direct, sans s'empêcher d'avoir recours à un travail du sol pour incorporer des résidus de culture (engrais vert), aérer le mulch pour exposer certains ravageurs aux oiseaux prédateurs, ou encore décompacter le sol afin de favoriser l'enracinement des cultures. Le recours au travail du sol permet clairement dans ces cas de limiter l'usage de produits phytosanitaires sur les parcelles agricoles. D'autres producteurs testent les potentialités d'associations de culture (soja semé dans le blé avant moisson), dans l'optique d'augmenter les rendements du soja en dérobé. Une étude approfondie de l'intérêt de combiner ces différentes innovations mériterait d'être entreprise.

Conclusion : Enseignements de cette étude pour la traque et l'évaluation des systèmes innovants conçus par les agriculteurs

Un premier enseignement de ce travail est **qu'une traque organisée permet, même dans une région en apparence homogène, de capter des systèmes alternatifs, dont certains s'avèrent très prometteurs, tant au plan agri-environnemental qu'économique**. L'ensemble des auteurs qui se sont dans les dernières années, consacrés à l'analyse des systèmes de production pampéens ont mis l'accent sur la description du processus de sojización, et sur les innovations qui lui sont liées. De fait, dans la Pampa argentine, la plupart des acteurs majeurs du système d'innovation (INTA, firmes agrochimiques, sélectionneurs, AAPRESID⁸) sont centrés sur l'amélioration du système de culture dominant et la correction, au coup par coup, de ses défauts les plus gênants⁹. Nous avons montré que des systèmes hors normes, qui empruntent parfois certains de leurs traits aux systèmes passés (travail du sol, lien avec l'élevage), mais qui sont innovants par la manière dont ils les combinent avec des options techniques originales (colza précédant un soja de seconde sole, retournement du mulch pour favoriser la consommation des ravageurs par les oiseaux etc.) sont mis en œuvre par certains producteurs.

Ces systèmes innovants constituent des sources d'idées, d'innovations pour améliorer durablement les modes de production pampéens.

L'évaluation de ces systèmes innovants s'est appuyée sur l'utilisation d'indicateurs économiques et agri-environnementaux. Les logiciels de calcul d'indicateurs standards, tels qu'INDIGO ou CRITER, se sont révélés extrêmement utiles. Mais, suivant en cela Petit *et al.* (2012), nous avons également noté que les producteurs innovants se donnaient d'autres critères d'évaluation de leurs systèmes que les ceux qui s'inscrivent dans le régime sociotechnique dominant. En particulier, le souci des impacts à long terme des pratiques sur la fertilité des sols est présent chez tous les producteurs qui allongent leurs rotations. Certains de ceux qui réduisent les pesticides, en s'appuyant sur différentes mesures de lutte agronomique contre les ennemis des cultures, se réfèrent également à un objectif de réduction des nuisances environnementales (qualité de l'eau, pollutions liées à l'épandage aérien). Cette attention aux critères d'évaluation que se donnent les producteurs nous a permis de montrer que **les « batteries d'indicateurs préfabriqués » peuvent ne pas contenir des indicateurs essentiels pour certains d'entre eux** : nous avons ainsi calculé un indicateur de risque, un indicateur de retour sur investissement ou un indicateur relatif au développement d'adventices résistantes au glyphosate, qui ne sont présents ni dans INDIGO, ni dans MASC, ni dans les autres « boîtes à outils » de même type, mais qui correspondent à des critères jugés majeurs par nombre de producteurs et de conseillers locaux.

⁸ Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa

⁹ Aujourd'hui : quel herbicide rajouter pour contrôler les adventices devenues résistantes au glyphosate ?

Pour restituer ces résultats d'évaluation de systèmes innovants aux acteurs de l'innovation de la région, nous avons choisi de les présenter sous forme de radars, sans agrégation par des outils d'analyse multicritères. Notre objectif n'était pas d'aider à choisir le meilleur système (auquel cas une agrégation multicritère aurait pu être pertinente), mais de faciliter la discussion entre des acteurs ne hiérarchisant pas les critères de la même manière, et donnant une importance variable aux impacts à long terme.

Enfin, nous souhaitons souligner que la démarche suivie pour caractériser et évaluer les systèmes innovants repose sur **l'analyse de la logique agronomique des systèmes de culture, c'est-à-dire la construction, sur chaque cas d'étude, d'un modèle conceptuel des relations entre les choix techniques successifs, et entre ceux-ci et les performances**. Cette analyse de leur logique agronomique a servi de base à l'élaboration de la typologie de systèmes innovants, et à l'explicitation des techniques clé, qui conditionnent l'originalité et les performances du système. Comme le soulignent Petit *et al.* (2012), elle constitue une étape essentielle à la construction de références à partir de cas d'étude. A l'opposé, la démarche qui consiste à ne rien faire d'autre que recueillir les pratiques et calculer des indicateurs (voir par exemple, pour des systèmes de grande culture argentins, Cerda et Sarandon, 2011) permet de porter une appréciation multicritère sur les pratiques pluriannuelles d'un agriculteur, mais ne donne aucune clé pour la construction de références : on ne peut dire comment ni à quelle condition un autre agriculteur sera susceptible d'obtenir des résultats similaires.

Cette démarche de traque et d'évaluation de systèmes innovants conçus par des agriculteurs n'en est qu'à ses débuts. Mais elle intéresse aujourd'hui un nombre croissant d'équipes de recherche et de développement. Aussi gageons que les difficultés méthodologiques qu'elle pose encore trouveront dans les prochaines années des réponses originales et inventives.

Remerciements : Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme International (Argentine-France-Brésil) Agriterris, financé par l'ANR (projet Interra) et l'INRA (département SAD). Il a bénéficié de l'appui de l'INTA (Balcarce). Nous remercions l'ensemble des collègues de l'INTA (au premier rang desquels J. Elverdin, M. Mosciari et F. Andrade), de l'INRA (en particulier C. Albaladejo, S. Chaxel et P. Gasselin), de l'AACREA (en particulier J. Gonzales-Montaner et N. Tagle), ainsi que tous les producteurs, contratistas et conseillers enquêtés.

Références bibliographiques

- Albaladejo C., 2011. Les transformations de l'espace rurale pampéen face à la mondialisation. *Annales de Géographie*. 27p.
- Altieri M.A., Funes-Monzote F.R., Petersen P., 2011. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty *Agron. Sustain. Dev.* DOI 10.1007/s13593-011-0065-6
- Andriulo A., B. Mary, J. Guérif. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*. 19. 365-377.
- Bockstaller C., Girardin P., 2008. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. UMR Nancy-Université-INRA Agronomie et Environnement Nancy-Colmar. Colmar.91p.
- Bonny S. 2011. Herbicide-tolerant Transgenic Soybean over 15 Years of Cultivation: Pesticide Use, Weed Resistance, and Some Economic Issues. *The Case of the USA. Sustainability* 3, 1032-1322.
- Carmona D.M., Tulli M.C. 2006. "Babosas" en siembra directa: alternativas de control. Agosto 2006. *Agrolluvia.com*
- Carreño L.V., Viglizzo E.F., 2010. Efecto de la agricultura sobre la provisión de servicios ecosistémicos. En: *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*.
- CASAFE, 2007. Guía de productos fitosanitarios para la república Argentina. Tomo 1 y 2. 2248p

Caviglia O.P., Sadras V.O., Andrade F.H., 2004. Intensification of agriculture in the south-estern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Research* 87, 117-129.

Cerda E., Sarandon S.J. 2001. The application of the Agroecological approach to sustainable management to temperate extensive systems. The case of "the Aurora" in the southeastern province of Buenos Aires, Benito Juarez. Argentina. Resumo do VII Congresso Brasileiro de Agroecologia – Fortaleza/CE 12 a 16/12/2011. 6p.

Chaxel S., Moity-Maizi P., Elverdin J., 2011. Nuevas categorías para reconstruir la historia y la actualidad agraria de Balcarce, VII Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y agroindustriales, Buenos Aires, 1-4 de noviembre de 2011, Centro Interdisciplinario de Estudios Agrarios de la Facultad de Ciencias Económicas de la UBA I.N.d.T.A., Grupo de Estudios Sociales Agrarios de la Facultad de Derecho y Ciencias Sociales de la UNCo, Doctorado en Estudios Sociales Agrarios del Centro de Estudios Avanzados de la UNC & Rede de Estudos Rurais - Brasil (ed.): 19.

Dominguez G.F., Studdert G., Echeverria H., 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. *Fertilidad INTA*. 23p.

Duparque A., Tomis V., Mary B., Boizard H., Damay N., 2011. Le bilan humique AMG. Pour une démarche de conseil fondée sur des cas-types régionaux. 10ème rencontre de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS ; Reims, 23-24 Novembre 2011. 19p.

Elverdín J. H., Maggio A., Muchnik J., 2011. Facteurs d'ancrage territorial des activités agricoles. Soja et élevage en Argentine. *Economie rurale* 322, 64-78.

Garavano M.E., Manetti P.L., Lopez A.N., Clemente N.L., Salvio C., Faberi A.J. 2013. Cebos molusquicidas y molusquicidas líquidos para el control de *Deroceras Reticulatum* (Pulmonata: Stylomatophora), plaga en el cultivo de colza. *RIA* 39 N°1. 7p.

Giancola S.I., Salvador M.L., Covacevich M., Iturrioz G., 2009. Análisis de la cadena de soja en la Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 117p. Estudios socioeconómicos de los sistemas agroalimentarios y agroindustriales.

Gonzales Montaner J., 2002. Cambios en el razonamiento en siembra directa : la visión sistémica aplicada a la nutrición y sus consecuencias sobre el balance de carbono. Jornada de actualización técnica para profesionales "fertilidad 2002". 7p. IPNI.

Goulet F. Pervanchon F., Conneau C., Cerf M., 2008 Les agriculteurs innovent par eux-mêmes dans leurs systèmes de culture. In R. Reau et T. Doré (Eds), *Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri, Dijon 53-69

Goulet F., Vinck D., 2012. L'innovation par retrait : Contribution à une sociologie du détachement. *R. franç. sociol.*, 53-2, 2012, 195-224

Hernandez V.A., Ould-ahmed P., Papail J., Phélinas P. 2007. Entrepreneurs "sans terre" et "pasteurs de la connaissance": une nouvelle bourgeoisie rurale? Hernandez V. *Turbulences monétaires et sociales. L'Amérique latine dans une perspective comparée*. Paris : l'Harmattan, 209-258pp. (Collection « sciences sociales et globalisation »).

Hernandez V.A., Ould-ahmed P., Papail J., Phélinas P. 2007. Entrepreneurs "sans terre" et "pasteurs de la connaissance": une nouvelle bourgeoisie rurale? Hernandez V. *Turbulences monétaires et sociales. L'Amérique latine dans une perspective comparée*. Paris : l'Harmattan, 209-258pp. (Collection « sciences sociales et globalisation »).

Hernandez V. 2009. Ruralidad y el paradigma de los agronegocios en las pampas gringas. *Gras C.*,

Hernandez V. *La Argentina rural. De la agricultura familiar a los agronegocios*. Buenos Aires: Biblos, 18p.

Iernamo M.J., Sarandon S.J. 2011. Applying Agroecology in extensive systems of temperate. The challenge of assessment and management of biodiversity. Resumo do VII Congresso Brasileiro de Agroecologia – Fortaleza/CE 12 a 16/12/2011. 6p.

Johnson W., Davis V., Kruger G., Weller S. 2009. Influence of glyphosate-resistant cropping systems on weed species shifts and glyphosate-resistant weed populations. *Europ. J. Agronomy* 31, 162-172.

Meynard J. M., 2012 La reconception est en marche ! Conclusion au Colloque « Vers des systèmes de culture innovants et performants : De la théorie à la pratique pour concevoir, piloter, évaluer, conseiller et former ». *Innovations Agronomiques* 20, 143-153

MAGyP, 2011. <http://www.siiia.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>

Miranda W.R., Andriulo A., Cirilo A.G., Otegui M.E., 2011. Simulación del carbono orgánico del suelo: doble cultivos vs monocultivos. INTA.

Ministère de l'Agriculture, 2010. Ecophyto 2018 : Rejoignez le réseau Ferme. <http://agriculture.gouv.fr/ECOPHYTO-2018-rejoignez-le-reseau>

Petit M.-S., Reau R., Dumas M., Moraine M., Omon B., Josse S., 2012. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil. *Innovations Agronomiques* 20, 79-100

Pochon A., 2008. Agronomes et paysans: un dialogue fructueux. Ed QUAE, Versailles, Coll. Sciences en questions. 72 pages.

Rearte D., 2011. Impacto de la expansión del cultivo de la soja en la producción de carne vacuna. Documento Interno. INTA. Programa Nacional de Carnes.

Sadok W., Angevin F., Bergez J. E., Bockstaller C., Colomb B., Guichard L., Reau R, Messéan A., Doré T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, DOI: 10.1051/agro/2009006.

Saluso A., De Carli R., Zaccagnini M.E., Bernardos J., Decarre J., Caceres C. 2005. Guía práctica para el control químico de artrópodos plaga en soja considerando el riesgo de toxicidad aguda para las aves. Proyecto monitoreo ecotoxicológico de biodiversidad en agroecosistemas pampeanos. INTA ISSN N° 0325-8874, 24p.

Studdert G., 2003. "Sojización", ¿un riego para los suelos del S.E. Bonaerense? 8p. 20° Jornada de Actualización Profesional sobre Cosecha Gruesa, 19/09/2003, Mar del Plata, Argentina.

Studdert G., Dominguez G., Agostini M., 2009. Labranzas y rotaciones para un uso sustentable de los suelos del sudeste de la provincia de buenos aires, Argentina. 5p. Simposio "Efectos de la Agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas, 20-21/08/2009, Montevideo, Uruguay.

Tomei J., Upham P., 2009. Argentinean soy-based biodiesel: An introduction to production and impacts. *Energy Policy* 37, 3890-3898.

Viglizzo E.F., Carreño L.V., Pereyra H., Ricard F., Clatt J., Pincén D., 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. In: Viglizzo, E.F y Jobbágy, E.G. (eds.). *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*. Ediciones INTA, ISBN N° 978-987-1623-83-9, p. 9-16.

Encadré n°1 : outils et méthodes utilisés.

CRITER – méthode INDIGO :

- **Indice de Succession Culturelle** : il permet d'évaluer les successions culturales mises en œuvre en prenant en considération dans la succession l'effet de la culture précédente, le temps de retour de la culture selon le temps recommandé et la diversité des cultures.
- **Les indicateurs de volatilisation de NH₃, d'émission de N₂O et de lessivage de NO₃** permettent d'évaluer les pertes azotées sur le système de culture en prenant en considération les apports en nitrate, le coefficient de volatilisation selon le type de fertilisant, le travail du sol, l'irrigation sur la parcelle, le mode d'apport des fertilisants, la consommation des cultures en place et les conditions pédo-climatiques du milieu.
- **L'indicateur énergie** : permet d'évaluer l'énergie consommée sur le système de culture (production de pesticides, d'engrais chimiques, utilisation de machines agricoles).
- **L'indicateur ICO** est basé sur l'utilisation de l'outil SIMEOS-AMG (Duparque *et al.*, 2011), le modèle AMG a été proposé et testé en Argentine (Andiulo *et al.*, 1999). Cet outil permet de simuler l'évolution des teneurs et stocks en Carbone Organique du sol, il est fondé sur le modèle de calcul du bilan humique AMG co-conçu par l'INRA et l'INTA. Il permet de prendre en considération les caractéristiques du système de culture et son environnement pédo-climatique. Les résultats de cet indicateur sont des teneurs en carbone organique (g/kg) obtenues à l'équilibre après 50 ans de mise en culture d'un système de culture donné.
- **Les IFT** : utilisation de la méthode conventionnelle développée par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et l'INRA (Brunet *et al.*, 2007). Les doses homologuées utilisées sont extraites du guide argentin de produits phytosanitaires (CASAFE, 2007).
- Les indicateurs de **maximisation de l'usage du sol** et de **présence d'adventices résistantes au glyphosate** proviennent directement des échanges avec les agriculteurs. La maximisation de l'usage du sol est le nombre de cultures mises en place en moyenne sur 5 ans (prise en considération des cultures dérobées). La présence d'adventices résistantes est un indicateur qualitatif, noté sur une échelle de 1 à 3, qui exprime le degré de gravité du développement des résistances (1= aucune présence d'adventice résistante au glyphosate relevée par le producteur ; 2= présence d'adventices résistantes n'ayant pas impliqué de changement du programme de désherbage sur la parcelle ; 3= présence d'adventices résistantes et recours à l'usage d'herbicides complémentaires).
- **Le Retour sur Investissement** : calculs réalisés sur la base des données fournies par les producteurs (détail des itinéraires techniques par culture par système de culture) et en mobilisant les coûts de production fournis par la Comisión de Agricultura CREA de Mar y Sierras y la Mesa de Asesores CREA de Mar y Sierras (CREA : Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola) (Communication personnelle N. Tagle, AACREA).
- L'indicateur de **Risque** est, pour un système de culture donné, le coefficient de variation calculé sur la base des variations théoriques interannuelles des prix et des rendements pour chaque culture de la rotation. Cet indicateur a été calculé avec la méthode de simulation « Monte Carlo » (Communication personnelle N. Tagle, AACREA).
- La **VAB grandes cultures** résulte du calcul de la Valeur Ajoutée Brute moyenne produite par les grandes cultures et les cultures fourragères annuelles (avoine, sorgho et ray-grass) de chaque système de culture (différence entre produits et charges par hectare). Les charges intègrent les coûts de main d'œuvre et de mécanisation, au tarif « contratista ». Compte tenu de la complexité du calcul à l'échelle du système de culture, et de la diversité des cas possibles, ce calcul ne prend pas en considération la valeur ajoutée produite par les prairies temporaires : pour le type5, le calcul de VAB ne concerne que les productions végétales, sur une durée de rotation raccourcie de 2 à 5ans).